

TNO-rapport
TM-96-A030

titel
**De fysiologische basis voor thermisch
comfort onder diverse klimatologische
omstandigheden; een voorstudie**

TNO Technische Menskunde

Kampweg 5
Postbus 23
3769 ZG Soesterberg

Telefoon 0346 35 62 11
Fax 0346 35 39 77

auteurs
R. Heus
G. Havenith

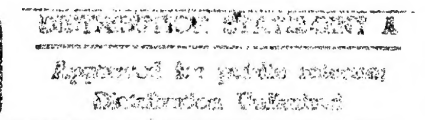
datum
7 augustus 1996

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

aantal pagina's : 48 (incl. bijlagen,
excl. distributielijst)



19970212 053

DTIC QUALITY INSPECTED 3



REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) RP 96-0167	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER TM-96-A030
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 789.2	5. CONTRACT NUMBER A93/KL/317	6. REPORT DATE 7 August 1996
7. NUMBER OF PAGES 48	8. NUMBER OF REFERENCES 92	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE De fysiologische basis voor thermisch comfort onder diverse klimatologische omstandigheden; een voorstudie (The physiological basis for thermal comfort in different climates; a preliminary study)		
11. AUTHOR(S) R. Heus and G. Havenith		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Human Factors Research Institute Kampweg 5 3769 DE SOESTERBERG		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Director of Army Research and Development Van der Burchlaan 31 2597 PC DEN HAAG		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE) Thermal comfort is very important for optimal functioning of humans. It gives information about the thermal state of the body, by which the human body can take physiological measures or the human can take behavioural measures to maintain thermal control. This will be the base of this study. Thermal comfort is sensed by warm and cold receptors in the skin, but also in deeper structures of the body. Pain receptors play a role in the detection of extreme cold and heat. The hypothalamus is the regulation and detection centre of temperature in the body, receiving afferent information of the receptors and sending efferent information to the effectors by which the body controls its temperature. Thermal comfort is determined by the temperature, pain and comfort sensations of the body. Also the experience of humidity can influence the comfort feelings. A problem in the study of comfort is the large diversity of the subjective scales used, which makes it difficult to compare the developed models. The goal of this study however is to make an inventory of most commonly used models and to judge them on useability for the existing thermoregulatory models. Local sensations are described as power functions based on psycho-physical functions and global sensations are described as linear functions. The most important dependent variables in global thermal comfort are core temperature, temperature of the extremities and temperature of the environment. In local thermal comfort and pain, temperature of the skin is most important. Humidity sensation of the skin is determined by temperature of the core, sweat production and local relative humidity of the skin.		
16. DESCRIPTORS Comfort Subjective Sensations Thermoregulation		IDENTIFIERS
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Unlimited availability		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)

titel : De fysiologische basis voor thermisch comfort onder diverse klimatologische omstandigheden; een voorstudie
auteurs : Drs. R. Heus en drs. G. Havenith
datum : 7 augustus 1996
opdrachtnr. : A93/KL/317
IWP-nr. : 789.2
rapportnr. : TM-96-A030

De studie naar het comfort van mensen is een eerste stap om meer inzicht te krijgen welke factoren een rol spelen in de (thermische) comfortbeleving. Thermisch comfort is een uiterst belangrijk gegeven in het functioneren van mensen. Thermisch comfort geeft informatie over de thermoregulatie van het lichaam, waardoor zonodig fysiologische processen op gang komen of gedragsmaatregelen genomen kunnen worden. Het lichaam wordt zodoende in staat gesteld in evenwicht te blijven. Dit regulatiemodel zal de basis zijn van deze studie. Doel van het onderzoek is een inventarisatie te maken van de huidige kennis omtrent comfort en modellen op te stellen, waarmee comfort op basis van de thermoregulatie kan worden voorspeld. De modellen dienen experimenteel te worden gevalideerd.

Warmte- en koudereceptoren in het lichaam zorgen via afferente signalen voor de bewustwording van thermisch comfort. Thermische pijn wordt door pijnreceptoren waargenomen en daarnaast speelt de hypothalamus een rol in de regulering en ervaring van temperatuur. Via efferente signalen zullen lichamelijke reacties op de waarneming van koude en warmte optreden. De lichaamsreacties worden besproken op globaal en lokaal niveau. Het thermisch comfort wordt bepaald door het comfort- en pijngevoel van het lichaam zelf, maar ook door de temperatuursensatie op zichzelf. Ook de ervaren vochtigheid heeft een aandeel in de ervaring van het thermisch gevoel.

Een probleem in de beschrijving van thermisch comfort is de diversiteit aan schalen. Dat maakt het erg moeilijk de modellen die op de schalen gebaseerd zijn met elkaar te vergelijken. Bepaalde ontwikkelde modellen worden op hun bruikbaarheid beoordeeld en de meest eenvoudige modellen zullen worden ingepast in bestaande thermoregulatiemodellen. Lokale sensaties worden als een powerfunctie beschreven gebaseerd op de psychofysiologie en globale sensaties worden als een lineaire functie beschreven.

De belangrijkste fysiologische en fysische parameters, die (thermisch) comfort voor het lichaam bepalen zijn kerntemperatuur, extremitetstemperaturen en omgevingstemperaturen. Pijn wordt voornamelijk door de lokale huidtemperatuur bepaald. Vochtsensatie is voornamelijk gebaseerd op de kerntemperatuur, lokale vochtigheid op de huid en (lokale) zweetproductie. De opgestelde modellen dienen experimenteel te worden gevalideerd op hun voorspellende waarde. Na eventuele bijstelling van de modellen is het mogelijk met bestaande thermoregulatie modellen (dis)comfort van mensen te voorspellen.

INHOUD	Blz.
SAMENVATTING	5
SUMMARY	6
1 INLEIDING	7
2 THERMISCH COMFORT	8
2.1 Inleiding	8
2.1.1 Begripsbepaling	8
2.1.2 Comfort indices	10
2.2 Regelmodel	11
2.3 Receptoren	15
2.3.1 Huid-thermoreceptoren	16
2.3.2 CZS-thermoreceptoren	19
2.3.3 Lichaams-thermoreceptoren	19
2.4 Effectoren	20
2.5 Comfort en koude	21
2.5.1 Inleiding	21
2.5.2 Comfort en het koude lichaam	23
2.5.3 Comfort en de koude periferie	23
2.6 Comfort en warmte	24
2.6.1 Inleiding	24
2.6.2 Comfort en het warme lichaam	24
2.6.3 Comfort en warme extremiteiten	25
3 COMFORTSCHALEN	25
3.1 Inleiding	25
3.2 Temperatuur	27
3.3 Comfort	27
3.4 Vochtigheid	28
3.5 Conclusie	29
4 COMFORT MODELLEN	29
4.1 Inleiding	29
4.1.1 Temperatuursensatie	29
4.1.2 Comfort- en pijnsensatie	36
4.1.3 Vochtigheidssensatie	37
4.1.4 Integratie	39
5 DISCUSSIE	41
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	42
REFERENTIES	44

Rapport nr.:	TM-96-A030
Titel:	De fysiologische basis voor thermisch comfort onder diverse klimatologische omstandigheden; een voorstudie
Auteurs:	Drs. R. Heus en drs. G. Havenith
Instituut:	TNO Technische Menskunde Afd.: Werkomgeving
Datum:	augustus 1996
DO Opdrachtnummer:	A93/KL/317
Nummer in MLTP:	789.2

SAMENVATTING

Thermisch comfort is een uiterst belangrijk gegeven in het functioneren van mensen. Thermisch comfort geeft informatie over de thermoregulatie van het lichaam, waardoor zonodig fysiologische processen op gang komen of gedragsmaatregelen genomen kunnen worden. Het lichaam wordt zodoende in staat gesteld in evenwicht te blijven. Dit regulatiemodel zal de basis zijn van deze studie. Warmte- en koudereceptoren nemen thermische prikkel waar en zorgen via afferente signalen voor de bewustwording van thermisch comfort. Thermische pijn wordt daarnaast door pijnreceptoren waargenomen en de hypothalamus speelt een rol in de regulering en ervaring van temperatuur. Via efferente signalen zullen lichamelijke reacties plaatsvinden op de waarneming van koude en warmte. Het thermisch comfort wordt bepaald door het comfort- en pijngevoel van het lichaam zelf, maar ook door de temperatuursensatie op zichzelf. Ook de ervaren vochtigheid heeft een aandeel in de ervaring van het thermisch gevoel.

Een probleem in de beschrijving van thermisch comfort is de diversiteit aan schalen. Dat maakt het erg moeilijk de modellen die op de schalen gebaseerd zijn met elkaar te vergelijken. Bestaande modellen worden op hun bruikbaarheid beoordeeld en de meest eenvoudige modellen zullen worden ingepast in de thermoregulatiemodellen. Lokale sensaties worden als een powerfunctie beschreven gebaseerd op de psychofysiologie en globale sensaties worden als een lineaire functie beschreven.

De belangrijkste fysiologische en fysische parameters, die (thermisch) comfort voor het lichaam bepalen zijn kerntemperatuur, extremitestemperaturen en omgevingstemperaturen. Pijn wordt voornamelijk door de lokale huidtemperatuur bepaald. Vochtsensatie is voornamelijk gebaseerd op de kerntemperatuur, lokale vochtigheid op de huid en (lokale) zweetproductie.

The physiological basis for thermal comfort in different climates; a preliminary study

R. Heus and G. Havenith

SUMMARY

Thermal comfort is very important for optimal functioning of humans. It gives information about the thermal state of the body, by which the human body can take physiological measures or the human can take behavioural measures to maintain thermal control. This will be the base of this study.

Thermal comfort is sensed by warm and cold receptors in the skin, but also in deeper structures of the body. Pain receptors play a role in the detection of extreme cold and heat. The hypothalamus is the regulation and detection centre of temperature in the body, receiving afferent information of the receptors and sending efferent information to the effectors by which the body controls its temperature. Thermal comfort is determined by the temperature, pain and comfort sensations of the body. Also the experience of humidity can influence the comfort feelings.

A problem in the study of comfort is the large diversity of the subjective scales used, which makes it difficult to compare the developed models. The goal of this study however is to make an inventory of most commonly used models and to judge them on useability for the existing thermoregulatory models. Local sensations are described as power functions based on psycho-physical functions and global sensations are described as linear functions.

The most important dependent variables in global thermal comfort are core temperature, temperature of the extremities and temperature of the environment. In local thermal comfort and pain, temperature of the skin is most important. Humidity sensation of the skin is determined by temperature of the core, sweat production and local relative humidity of the skin.

1 INLEIDING

Het bereiken van een thermofysiologisch evenwicht onder alle klimatologische omstandigheden is van belang om mensen zowel fysiek als mentaal optimaal te kunnen laten presteren. Het thermofysiologisch evenwicht wordt beïnvloed door fysische factoren, fysiologische factoren en door menselijk gedrag.

Naast klimatologische parameters (o.a. temperatuur, wind, zon(nestraling) en luchtvochtigheid) wordt het fysiologisch evenwicht ook beïnvloed door de verrichte arbeid (interne warmteproductie) en de hoeveelheid en het type kleding (isolerende waarde) die het lichaam bedekt. Deze combinatie van factoren samen bepaalt de warmtebalans van het lichaam, die alleen in evenwicht is als de hoeveelheid afgegeven warmte gelijk is aan de geproduceerde warmte. Behalve de fysiologische en fysische factoren, die bepalen of mensen in thermofysiologisch evenwicht zijn of niet, spelen factoren als het temperatuur-, comfort-, vochtigheid en pijngevoel een belangrijke rol in de subjectieve waarneming van de thermoregulatie. Deze subjectieve sensaties kunnen een uitstekend hulpmiddel zijn voor mensen bij het bepalen van hun thermofysiologische toestand en zelfs bij het handhaven van thermofysiologisch evenwicht (Jetté e.a., 1994). Veel is al bekend over subjectieve sensaties van mensen in hun (thermische) omgeving en er wordt beweerd dat subjectieve scores meer zeggen over het ervaren van de thermische omgeving dan de thermofysiologische toestand van het lichaam (Gystad & Bakkevig, 1994). Het moge duidelijk zijn dat wanneer mensen comfortabel zijn, zij optimaal kunnen presteren en tevreden zijn met hun (werk)omgeving. Thermisch comfort speelt een belangrijke rol in zowel de uitoefening van fysieke taken als de uitoefening van mentale taken. Indien men zich oncomfortabel voelt zal het prestatieniveau dalen. Toch kan matige warmte soms een verbetering in het mentaal functioneren betekenen (Poulton & Edwards, 1974), maar wanneer de warmte ernstig wordt zullen de prestaties toch weer afnemen (Colquhoun & Goldman, 1972) en zal de frequentie van onveilig gedrag toenemen. Ook in de kou zullen taken die veel aandacht vragen moeilijker worden, zal het aantal fouten groter worden (Enander, 1987) en kunnen eveneens onveilige situaties ontstaan, terwijl eenvoudige taken in een koele omgeving juist weer beter uitgevoerd worden. Het is daarom van groot belang dat men zich onder alle omstandigheden zo comfortabel mogelijk voelt.

In een aantal normen en aanbevelingen is vastgelegd aan welke eisen (werk)omgevingen moeten voldoen willen mensen nog op een comfortabele wijze hun arbeid kunnen verrichten (NEN-ISO 7730, 1989; CV 26, 1993). Hierin wordt op basis van kledingisolatie, fysieke arbeid en klimatologische omstandigheden bepaald of een arbeidsklimaat voldoet aan de comforteisen. Veel onderzoek naar thermisch comfort is verricht door ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers). Dat onderzoek is vooral gericht op het comfort in een gematigd (binnen)klimaat (Prescriptive Zone) (o.a. Fanger, 1970; McIntyre, 1981). Voor extreme klimatologische omstandigheden voldoen de meeste normen niet.

Om comfort te kunnen bepalen in adviezen en normen moet de relatie tussen subjectief geregistreerde sensaties van temperatuur, comfort, pijn etc. en fysiologisch te meten grootheden als huidtemperatuur, kerntemperatuur, vochtigheid van de huid etc. worden

bepaald. Onderzoek naar die relatie is o.a. door Havenith en Van Middendorp (1985) uitgevoerd. Zij vonden dat de subjectieve temperatuursensatie voor het gehele lichaam voornamelijk gerelateerd is aan de huidtemperatuur van de extremiteiten en de relatieve vochtigheid van de huid. De vochtigheidssensatie wordt voornamelijk bepaald door de gemeten relatieve vochtigheid van de huid, hetgeen overeenkomt met data van McIntyre (1981). Soortgelijk onderzoek naar de relatie tussen subjectief geregistreerde maten en de fysiologisch te meten grootheden is ook door anderen uitgevoerd (o.a. Goldman, 1977), waarin voor koude omstandigheden op basis van de toegestane warmte-opslag in het lichaam bepaald wordt wat de laagst toegestane gemiddelde huidtemperatuur mag zijn. Het lichame-lijk comfort wordt ook sterk bepaald door lokale temperatuursensaties van de extremiteiten (hoofd, handen en voeten) (Havenith & Van Middendorp, 1985).

Een andere benaderingswijze gaat uit van het klimaat zelf en legt vast welke omgevingstemperatuur nog comfortabel is op basis van kledingisolatie en lichaamstemperaturen (Gagge & Nishi, 1976).

Onder opdrachtnummer A93/KL/317 is een literatuurstudie uitgevoerd, om de huidige kennis op het gebied van subjectieve sensaties en comfort in kaart te brengen met als doel op basis van de huidige thermoregulatorische modellen schattingen te kunnen maken van de ervaren thermofysiologische toestand van het lichaam onder (extreme) klimatologische en thermische condities. De vraag die in dit rapport centraal staat is of het mogelijk is met de huidige kennis een comfortmodel te formuleren dat in staat is om comfort onder alle omstandigheden te voorspellen. Indien dat het geval is, is de volgende stap experimentele validatie van de beschreven modellen. Dat experiment zal zodanig van opzet zijn dat voor een aantal combinaties van arbeid en klimaat de warmtebalans van proefpersonen wordt uitgerekend en dat deze proefpersonen zelf continu aangeven hoe zij hun thermische (lichaams)toestand ervaren. Met de verkregen informatie worden de comfortmodellen gevalideerd en wordt tevens onderzocht of de huidige modellen de best voorspellende zijn.

2 THERMISCH COMFORT

2.1 Inleiding

2.1.1 Begripsbepaling

Geklede mensen kunnen zich in een bepaalde omgeving tijdens een bepaalde mate van arbeid al of niet comfortabel voelen. Een omgeving wordt als comfortabel ervaren als de mensen zich comfortabel voelen. Dat impliceert dat voor de beoordeling van comfort niet alleen de omgeving gemeten wordt, maar ook naar het oordeel van de mensen in die omgeving gevraagd wordt. Comfort is echter nauwelijks een objectief meetbaar begrip. Het stellen van de vragen over comfort is al van invloed op hoe de omgeving ervaren wordt. Een vraag als "Voelt u zich comfortabel?" zal een ander resultaat geven dan "Geeft factor X u een oncomfortabel gevoel?". Gewaakt zal moeten worden om de vraagstelling zeer nauwgezet en neutraal te doen. Bovendien leveren dit soort subjectieve maten grote inter-individuele verschillen op.

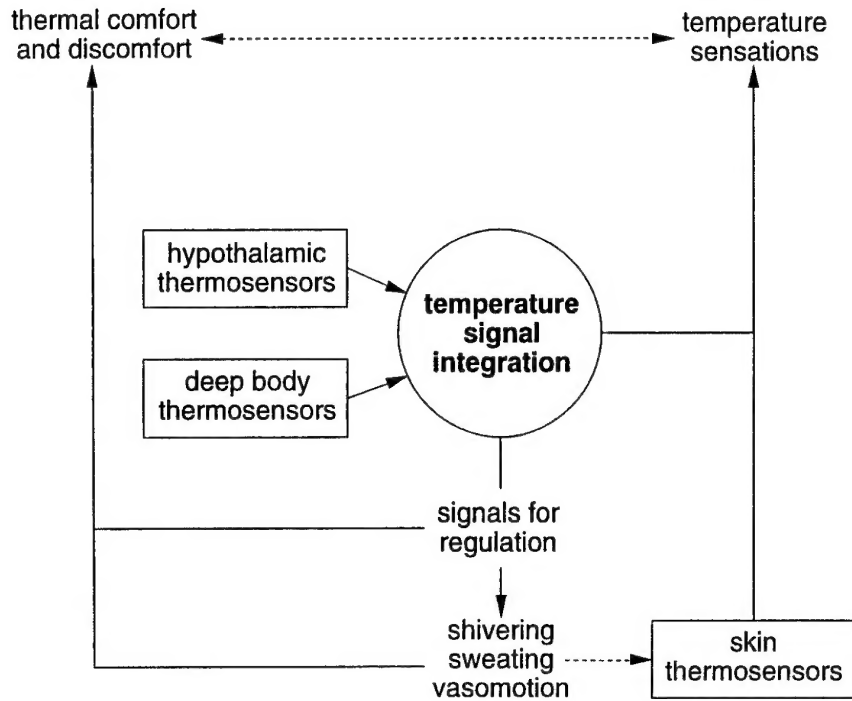


Fig. 1 Fysiologische parameters die aan thermisch comfort gelieerd zijn (Hardy e.a., 1971).

In Fig. 1 worden fysiologische maten die aan thermisch comfort ten grondslag liggen schematisch weergegeven. In de figuur is duidelijk dat de temperatuur op drie niveaus in het lichaam worden waargenomen, nl. in de hypothalamus, centraal in het lichaam en in de huid. Temperatuursensatie d.m.v. receptoren zal later in dit rapport worden besproken. Thermisch (dis)comfort is een integratie van fysische omgevingssignalen (temperatuur, vochtigheid, wind) die door het lichaam worden waargenomen in combinatie met de huidige thermische toestand van het lichaam. De temperatuursensaties leiden tot een reactie en d.m.v. efferente signalen wordt de thermoregulatie (fysiologische reacties) aan de nieuwe situatie aangepast (Hensel e.a., 1973). Informatie over de subjectieve temperatuursensatie wordt voornamelijk aan de hand van temperatuurinformatie van de huidreceptoren bepaald (Hensel, 1981). Ook kunnen lokale temperaturen een belangrijke rol vervullen in de gewaarwording van thermisch comfort, onafhankelijk van hun bijdrage aan de (gemiddelde) lichaamstemperatuur. Sterke perifere vasoconstrictie in de extremiteiten als gevolg van koude kan tot een sterk gevoel van (koude) discomfort en pijn leiden en niet alleen maar een koudesensatie geven. Vasodilatatie bij dezelfde lage temperaturen kan het discomfort alweer sterk verminderen, zoals door Daanen en Heus (1993) is geconstateerd. Zelfs bij een niet-verstoorde temperatuurregulatie kunnen zulke verschijnselen optreden. Ook het omgekeerde kan plaatsvinden, nl. dat het lichaam warmte verliest zonder dat discomfort ontstaat als de extremiteiten maar warm genoeg gehouden worden (Hensel e.a., 1973).

2.1.2 Comfort indices

Om comfort ook in klimaatparameters weer te geven zijn meerdere indices ontwikkeld, waarvan hier de voornaamste zullen worden vermeld (Tabel I). Ten eerste is er de operationele temperatuur (T_o) (Gagge, 1940), die een lineair gemiddelde van de omgevingsluchttemperatuur en de gemiddelde stralingstemperatuur is. Verder kan de warmte uitwisseling via de huid worden uitgedrukt in de effectieve temperatuur (ET^*) (Yaglou & Miller, 1925) of de vochtige operationele temperatuur (T_{oh}) (Nishi & Gagge, 1971). Dan kunnen de standaard operationele temperatuur (T_{so}) (Gagge, 1940), standaard omgevingswaterdampdruk (e_{so}) (Gagge, 1981) en de standaard effectieve temperatuur (SET) (Gagge e.a., 1986) worden gebruikt in een omgeving, rekening houdend met een referentie-omgeving met standaard kleding en een standaard luchtverplaatsing waarin zowel het waarneembare als het niet-waarneembare warmte-transport via de huid worden gecombineerd. Deze indices gaan echter allemaal uit van de fysische omgeving, zonder rekening te houden met de fysiologische reacties van het lichaam op deze prikkels.

Tabel I Comfort indices.

Comfortindex	Symbool	Definitie
Operatieve temperatuur	T_o	de temperatuur van een uniform zwart omhulsel waarin een mens dezelfde hoeveelheid warmte door straling en convectie verliest als in de actuele niet isotherme omgeving
Vochtige operatieve temperatuur	T_{oh}	de uniforme temperatuur van een denkbeeldig zwart omhulsel bij een relatieve luchtvochtigheid van 100%, waarin een vochtig object of een mens dezelfde warmte-uitwisseling d.m.v. straling, convectie en verdamping zou hebben als in de actuele omgeving
Standaard operatieve temperatuur	T_{so}	de temperatuur van een uniform omhulsel waarin men gekleed in $0,09 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ in stilstaande lucht op zee-niveau dezelfde hoeveelheid voelbare warmte verliest als in een testomgeving
Effectieve temperatuur	ET^*	de temperatuur van een denkbeeldige uniforme zwarte omhulling en een luchtvochtigheid van 50%, waarin een mens dezelfde warmte-uitwisseling door straling convectie en verdamping zou hebben als in de actuele omgeving
Standaard effectieve temperatuur	SET	de temperatuur van een denkbeeldige omhulling bij een relatieve luchtvochtigheid van 50% waarin een mens in rust gekleed in standaardkleding ($0,09 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) in stilstaande lucht dezelfde hoeveelheid warmte verliest door voelbaar en niet-voelbaar warmtetransport als in de actuele omgeving
Standaard omgevingswaterdampdruk	e_{so}	de waterdampdruk van een uniforme omhulling waarin een standaard gekleed mens ($0,09 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) dezelfde hoeveelheid niet-voelbare warmte aan de huid verliest als in een testomgeving

De verschillen in dit soort indices zitten met name in de definiëring van de standaard referentie omgeving. Als voorbeeld voor interpretatie van een index wordt de effectieve temperatuur (ET^*) genomen. Een standaard gekleed mens in rust bij 20°C en een relatieve luchtvochtigheid (RV) van 100% in een ruimte zonder straling en luchtbeweging ervaart hetzelfde comfort als bij 25°C en een RV van 35%. Beide klimaten worden gedefinieerd als een ET^* van 20°C .

In de volgende paragrafen zal comfort in een fysiologisch referentiekader worden geplaatst en worden besproken in het kader van koude- of warmteblootstelling en wordt aangegeven waar de fysiologische reacties een rol spelen in de subjectieve ervaring van comfort. Het zal daarbij gaan om thermisch comfort, dat naast de sensaties van temperatuur, ook van vocht- en pijnprikkels afhankelijk is.

2.2 Regelmodel

De regulering van de lichaamstemperatuur bestaat uit een regelend systeem (=actie) en een geregeld systeem (=toestand) (Fig. 2).

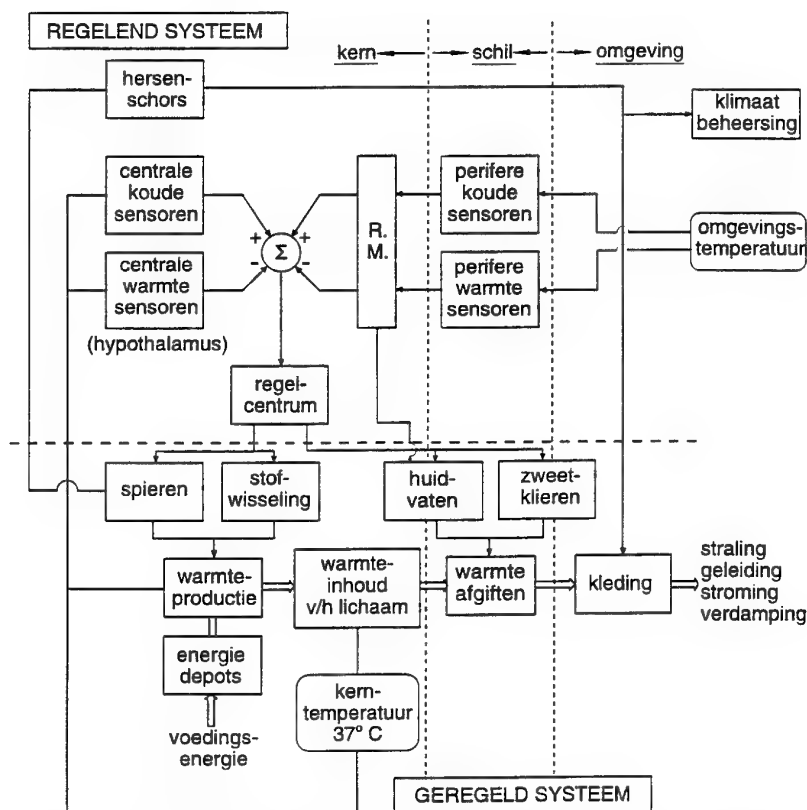


Fig. 2 Regelschema voor de regulatie van de lichaamstemperatuur (Bernards & Bouman, 1983).

De hersenen en de perifere thermosensoren vormen het regelende systeem, waar de prikkels uit de thermische omgeving worden waargenomen en verwerkt. Het geregelde systeem bestaat uit de huid en slijmvliezen (warmte-afgifte), de stofwisseling (warmteproductie) en de circulatie (warmtetransport). De warmtebalans staat voortdurend bloot aan verstoringen doordat uitwendige omstandigheden (hitte en koude) de warmte-afgifte beïnvloeden en de stofwisseling een verandering in warmteproductie en warmtetransport teweeg kan brengen. In beide gevallen grijpt de verstoring van het evenwicht aan in het geregelde systeem dat door de mens als een verandering in het (thermisch) comfort wordt ervaren. Dat wil zeggen door een actie van het regelend systeem wordt de toestand van het geregelde systeem beïnvloed.

De waarneming van comfort ligt in het regelend systeem, maar wordt sterk beïnvloed door het geregelde systeem. In het verleden werd thermisch comfort, of ook wel de thermofysiologisch neutrale toestand gekenmerkt door (Precht e.a., 1973):

- 1 een interne lichaamstemperatuur van tussen 36,6 en 37,1°C
- 2 een gemiddelde huidtemperatuur van 33 tot 34,5°C voor mannen en 32,5 tot 35°C voor vrouwen
- 3 een maximale variatie in lokale huidtemperaturen van 32°C tot 35,5°C
- 4 een actieve temperatuurregulatie d.m.v. vasomotoriek (vasoconstrictie) van de huid zonder te zweten of te rillen.

Een thermisch neutraal klimaat wil zeggen de range in omgevingstemperatuur waarin het metabolisme bij een bepaald arbeidsniveau minimaal (dus geen rillen) is en de temperatuur waarbij de thermoregulatie bereikt kan worden door non-evaporatieve processen (Bligh & Johnson, 1973).

Tegenwoordig is het zo dat thermisch comfort niet meer per definitie omschreven wordt als een thermofysiologisch neutrale toestand, maar dat door lokale comfortverschillen juist een algeheel thermisch comfort kan bestaan. Vooral de temperatuur van de extremiteiten kan buiten de door Precht e.a. (1973) genoemde temperatuurrange voor variatie in lokale huidtemperaturen vallen (Hensel, 1981).

Thermisch comfort weerspiegelt de bundeling van diverse thermische prikkels op het lichaam en bestaat uit signalen die temperatuursensaties oproepen, signalen voor de temperatuurregulatie en sensaties van regulerende activiteiten als vasomotoriek, huidbloedflow, transpiratie en rillen (Hardy, 1970). Thermisch comfort is dus zeer nauw verbonden met de thermoregulatie hetgeen ook blijkt uit de relatie die Gonzalez e.a. (1973) vonden tussen de toename in discomfort en de toename in zweetproductie (Fig. 3). Discomfort wordt hier weergegeven als een maat van de discomfort-intensiteit. Deze maat zal in § 4.1.1 nader worden besproken.

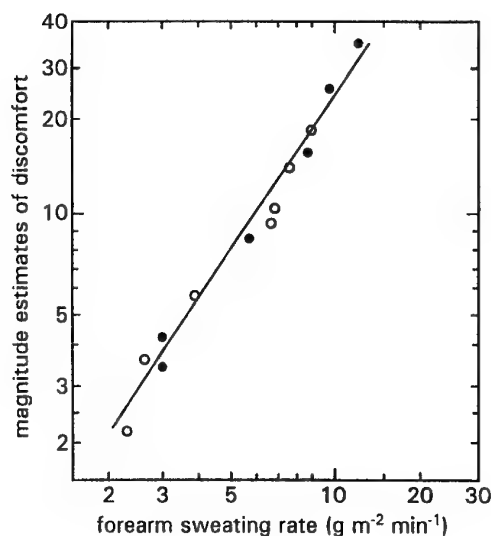


Fig. 3 Relatie tussen mate van discomfort en de zweetproductie van de onderarm (Gonzalez e.a., 1973).

Deze lokale zweetproductie is een goede weergave van de centrale zweetprikkel die weer een functie is van de interne temperatuur (Gonzalez e.a., 1973). Een dergelijke één op één koppeling van thermisch comfort en temperatuurregulatie wordt tegengesproken door Bleichert e.a. (1973). Zij vonden dat proefpersonen in een bad thermofysiologisch neutraal konden blijven door zelf de watertemperatuur te regelen. De resulterende toename in lichaams- en huidtemperatuur tijdens het geleidelijk opvoeren van de badtemperatuur gaf een toename in de zweetproductie te zien zonder dat dat gepaard ging met een toename in thermisch discomfort (het was juist de bedoeling comfortabel te blijven). Hieruit blijkt volgens Hensel (1981) dat voor verschillende functies in de thermoregulatie (warmte-afgifte, warmteproductie) onder wisselende omstandigheden (omgeving, arbeid, kleding) andere weegfactoren aan interne temperatuur en huidtemperatuur gegeven moeten worden om de thermoregulatie te beschrijven.

Hensel (1981) geeft in een overzicht weer hoe thermisch comfort in het lichaam geregeld wordt, waarbij ook de invloed van lokale factoren wordt betrokken in de gewaarwording van (thermisch) comfort (Fig. 4). De neurale en humorale processen die een rol spelen in temperatuursensatie, thermisch comfort en temperatuurregulatie zijn schematisch in de figuur weergegeven.

Uit de figuur blijkt dat verwarming van de huid leidt tot een stimulatie van de warmtereceptoren. Als de drempelwaarde wordt overschreden leidt de stimulatie van deze receptoren tot een gewaarwording van warmte. De subjectieve warmtegevoelens leidt tot een stimulatie van de zweetsecretie en op die manier wordt warmte aan de huid onttrokken, zodat de warmtegevoelens kan worden getemperd of zelfs via vasomotore regulatie overgaan in een koudegevoelens.

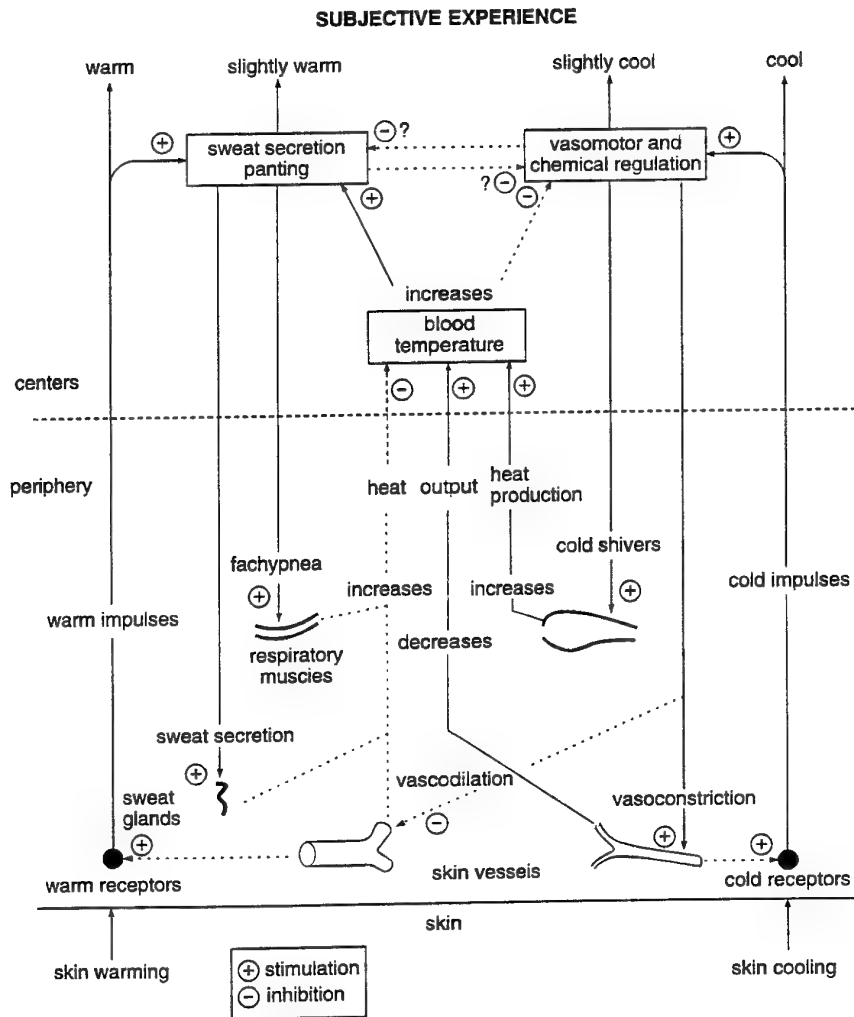


Fig. 4 Fysiologisch regelschema voor waarneming van temperatuur(veranderingen), comfort en temperatuurregulatie (Hensel, 1952).

Thermisch comfort bestaat uit een bundeling van thermische prikkels uit verschillende plaatsen van het lichaam. De bundeling van prikkels kent echter wel beperkingen, d.w.z. dat wanneer plaatselijk de huidtemperatuur sterk afwijkt van de gemiddelde waarde van de huidtemperatuur, lokaal thermisch (dis)comfort kan ontstaan onafhankelijk van het algehele thermisch comfort. Koude voeten bijvoorbeeld kunnen een oncomfortabel gevoel geven, terwijl de rest van het lichaam thermisch comfortabel of zelfs oncomfortabel warm is (Hensel, 1981). Deze discrepantie geeft aan dat onderscheid moet worden gemaakt tussen lokaal en algemeen thermisch comfort. In het model van Hensel (1952) komt dit niet goed tot uiting. Een nadere invulling van dit regelmodel zal later in dit rapport worden gegeven als thermisch comfort door verschillende auteurs als functie van fysiologische grootheden wordt beschreven.

Naast klimaat en arbeid, beïnvloedt kleding in belangrijke mate de thermoregulatie en daarmee het comfort. Een eerste stap om deze parameters in één model te beschrijven is gedaan door Lotens (1993). Dit model (Fig. 5) is een integratie van het gecombineerde

kledingmodel en een thermoregulatie model, dat in staat is in dynamische situaties voorspellingen te doen over de thermoregulatorische responsen.

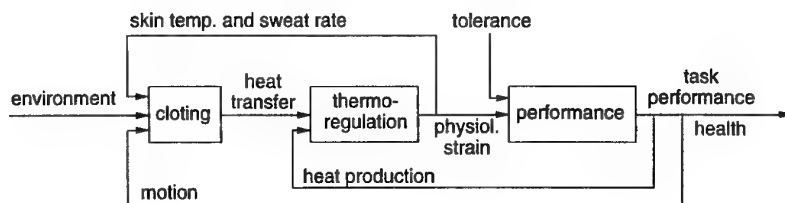


Fig. 5 Een schematische voorstelling van de relatie tussen klimaat, kleding en lichamelijke activiteit en de thermoregulatie (Lotens, 1993).

Het model is niet ontworpen om comfortvoorspellingen te doen, maar kan wel worden gebruikt om bepaalde subjectieve sensaties te verklaren. Dit zal nader worden uitgewerkt in § 4.1.4.

2.3 Receptoren

Temperatuurwaarneming begint met een prikkeling van de huidreceptoren of de diep in het lichaam gelokaliseerde thermoreceptoren. Die prikkeling wordt via het centrale zenuwstelsel doorgegeven naar het temperatuurregulatie centrum in de hersenen en men neemt een temperatuursensatie waar (Hensel, 1981).

Warmte wordt vooral door de thermoreceptoren in de kern van het lichaam (hypothalamus) waargenomen (Hensel, 1981). Het algehele lichaamscomfort tijdens warmte is derhalve meer bepaald door de kern (Benzinger, 1969; Schönbaum & Lomax, 1990). Tijdens koude worden vooral de thermoreceptoren in de huid geprikkeld en het comfort in een koude omgeving wordt daarom meer door de huid dan door de kern bepaald (Benzinger, 1969; Hensel, 1981).

Temperatuurreceptoren onderscheiden zich van andere receptoren op grond van een aantal kenmerken, nl:

- 1 een stijging in vuurfrequentie als een koudereceptor wordt gekoeld,
- 2 een gelijktijdige daling van de vuurfrequentie van de warmte receptoren,
- 3 een vaste vuurfrequentie bij een bepaalde temperatuur,
- 4 geen respons of een zeer hoge drempel voor mechanische stimuli,
- 5 gevoeligheid voor temperatuur vergelijkbaar met de waargenomen sensatie.

Naast de specifieke thermosensoren zijn er ook nog pijnreceptoren (nociceptoren) in het lichaam (De Reuck & Knight, 1966; Voorhoeve, 1978). Dit zijn vrije zenuwuiteinden, voornamelijk gelokaliseerd in de huid, spieren en ingewanden (Voorhoeve, 1978) die betrokken zijn bij de ervaring van pijn. Hoewel de nociceptoren betrokken zijn bij de waarneming van meerdere vormen van pijn, zal in dit rapport alleen thermische pijn worden besproken. Dat is een pijnsensatie, die optreedt bij (huid)temperaturen boven de 43°C (Hardy & Stolwijk, 1966) en beneden de 15°C (Heus e.a., 1995).

2.3.1 Huid-thermoreceptoren

Temperatuurspecifieke receptoren vinden hun oorsprong in de neurale fysiologie (Zotterman, 1959). In de neurale fysiologie wordt er vanuit gegaan dat temperatuursensaties gekoppeld zijn aan neurale structuren in het lichaam. Uit gedetailleerd onderzoek bleek onderscheid te bestaan tussen koude- en warmtesensoren in de huid (Hardy, 1961; Blix, 1882 in Hensel, 1981). De koudesensoren worden geprikkeld bij afkoeling van de huid en de warmtesensoren worden juist geprikkeld tijdens verwarming van het huidoppervlak. Dit is duidelijk als gekeken wordt naar de reacties op van beide typen sensoren op temperatuur en temperatuurveranderingen (Fig. 6).

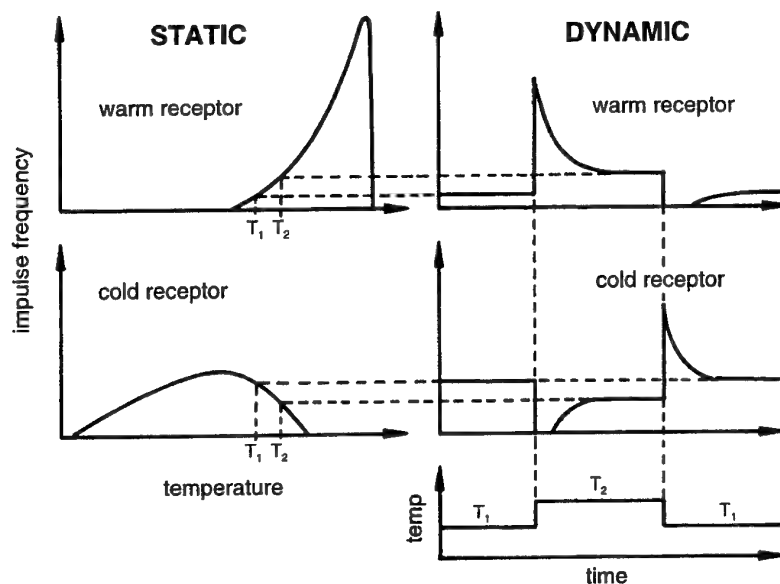


Fig. 6 Eigenschappen van thermoreceptoren tijdens constante temperatuur en tijdens temperatuurveranderingen (Precht e.a., 1973).

Bij constante temperatuur geven beide typen receptoren een vaste vuurfrequentie te zien kenmerkend voor die temperatuur. Bij deze temperatuur hoort een bepaalde gewaarwording van die temperatuur. Temperatuurveranderingen geven een duidelijke impuls (positief of negatief) in de vuurfrequentie van de receptoren te zien, waarna zich een nieuw vuurfrequentie-evenwicht instelt met een daarbij behorende sensatie.

De verdeling van de temperatuurreceptoren is niet homogeen over de huid, zoals in Tabel II te zien is.

Er zijn veel meer koude- dan warmtesensoren in de huid aanwezig. De huid blijkt echter niet gevoeliger te zijn voor koude dan voor warmte. Doordat de vuurfrequentie van de koudesensoren lager is dan voor de warmtesensoren moeten meer koudesensoren geprikkeld worden om tot eenzelfde gewaarwording te komen als bij prikkeling van een bepaald aantal warmtesensoren (Hensel, 1977). De prikkels mogen namelijk gewoon gesommeerd worden (Hensel, 1981).

Tabel II Gemiddeld aantal koude- en warmtesensoren per cm² menselijke huid (gemodificeerd naar Strughold & Porz, 1931; Rein, 1925).

Lichaamsdeel		Koudesensoren per cm ²	Warmtesensoren per cm ²
Hoofd	totaal	8,0	1,5
	lippen	17,5	
Romp	voorzijde	9,0	0,3
	achterzijde	7,8	
Arm	boven	6,0	
	onder	7,0	0,4
Hand	rug	7,4	0,5
	palm	3,0	0,4
Vingers	dorsaal	8,0	1,7
	volar	3,0	1,6
Been	boven	4,9	
	onder	5,0	0,4
Voet	wreef	5,6	
	zool	3,4	

Hardy (1961) concludeerde daarentegen wel dat het lichaam gevoeliger voor warmte is dan voor koude, omdat een 2½°C temperatuurstijging van de gemiddelde huidtemperatuur al een onplezierig gevoel geeft, terwijl dat pas bij meer dan 4½°C temperatuurdaling van de gemiddelde huidtemperatuur het geval is. Hieruit blijkt dat het grote aantal koudesensoren toch niet voldoende compenseert voor de geringere activiteit die zij vertonen en dat het lichaam inderdaad gevoeliger is voor warmte.

Tabel III Bijdrage van lichaamsdelen aan de (a) gemiddelde huidtemperatuur, (b) warmtegevaarwording en (c) koudegevaarwording, alle naar huidoppervlak (naar Crawshaw e.a., 1975).

Lichaams- deel	Bijdrage T _{huid}	Ervaren warmte	Ervaren koude
Gezicht	0,07	0,21	0,19
Borst	0,09	0,10	0,08
Buik	0,18	0,17	0,12
Rug (boven)	0,09	0,11	0,09
Bovenbenen	0,16	0,15	0,12
Onderbenen	0,16	0,08	0,15
Bovenarmen	0,13	0,12	0,13
Onderarmen	0,12	0,06	0,12
Totaal	1,00	1,00	1,00

De gevoeligheid voor beide typen sensoren over het lichaam is ongelijk over het lichaam verdeeld. Zo zijn sommige plekken gevoeliger voor temperatuurprikkel (warmte en koude) dan andere (Tabel III).

Uit de Tabellen II en III blijkt dat sommige relatief kleine huidoppervlakken, zoals het hoofd erg gevoelig voor temperatuurprikkel zijn. Deze lichaamsoppervlakken zullen daarom een grotere bijdrage leveren aan een thermisch (dis)comfortabel gevoel.

In tegenstelling tot de weegfactoren van Crawshaw e.a. (1975) vond Stevens (1979) juist dat de koudesensaties het sterkst zijn voor de romp, het zwakst voor het gezicht en ergens daartussenin voor de extremiteiten. Voor de warmtesensaties stemmen de resultaten van Crawshaw e.a. (1975) en Stevens e.a. (1974) overeen. De regionale verschillen zijn vooral aanwezig bij geringe stimulatie en verdwijnen bij sterke stimulatie van de sensoren. Stevens (1979) concludeerde dat hoewel voor het gezicht zwakke sensaties optreden bij geringe koeling, verschillen in temperatuur veel beter door het hoofd kunnen worden geregistreerd dan door andere lichaamsdelen en het hoofd daardoor veel betere informatie over temperatuurverschillen oplevert.

Volgens Guyton (1981) worden thermische prikkels met drie typen sensoren waargenomen. Dat zijn de al eerder genoemde koude- en warmte-sensoren en de pijnsensoren. De pijnsensoren geven twee typen sensaties nl. de warmte pijnsensatie en de koude pijnsensatie (Fig. 7).

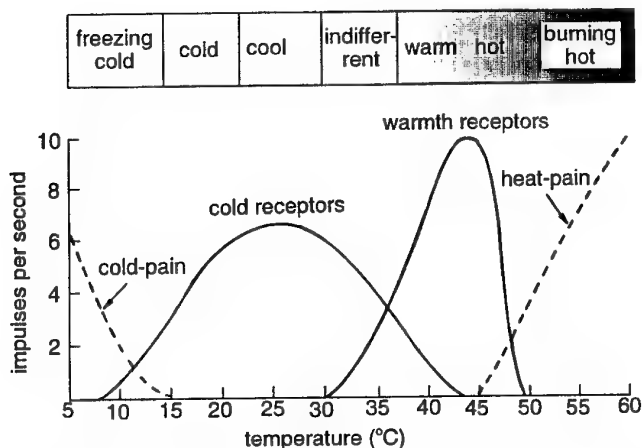


Fig. 7 Vuurfrequenties van een koudepijn-, een koude-, een warmte- en een warmtepijnsensor bij verschillende temperaturen (Guyton, 1981).

De pijnsensoren geven bij hoge vuurfrequentie dezelfde gewaarwording, nl. pijn en temperatuur is daarin niet meer te onderscheiden. Deze pijn is volgens Guyton (1981) een beschermingsmechanisme van het lichaam om verdere schade aan het lichaam te voorkomen en kan tevens gezien worden als de meest extreme vorm van discomfort.

2.3.2 CZS-thermoreceptoren

De hypothalamus is het zogenaamde temperatuur regulerende orgaan in het lichaam. In de hypothalamus van dieren liggen twee specifieke gebieden die een rol spelen in de thermoregulatie. Bij dieren (o.a. schapen; Rawson & Quick, 1970) zal prikkeling van het voorste deel van de hypothalamus vooral leiden tot hijgen en vasodilatatie en stoppen van rillen met als gevolg daling van de kerntemperatuur. Dit deel van de hypothalamus wordt daarom ook wel het warmtecentrum genoemd. Stimulatie van het achterste deel leidt juist tot de tegenovergestelde reacties als kouderillingen en vasoconstrictie wat juist een hogere kerntemperatuur tot gevolg heeft. Daarom wordt dit deel ook wel het koudecentrum genoemd. Bij mensen is een dergelijke strikte scheiding niet aangetroffen, maar ligt de onderverdeling als volgt: het voorste gedeelte is vooral belangrijk voor de waarneming van temperatuur (centrale thermosensoren), terwijl het achterste deel meer een rol speelt als schakelstation naar de hersenen en het ruggemerg om het lichaam daarna op de juiste manier te laten reageren (vasodilatatie, vasoconstrictie, zweten, rillen etc.) op veranderingen in temperatuur (regulering van lichaamstemperatuur) (Bernards & Bouman, 1983).

De temperatuursignalen worden waargenomen door in de hypothalamus liggende neurons, maar erg veel is daarover nog niet bekend. Van sommige van deze neurons is bekend dat hun output lineair met de temperatuurverandering varieert, maar de output van de meest gevoelige neurons heeft juist een exponentieel verband met de temperatuurverandering (Hensel, 1981). Daarnaast zijn sommige neurons temperatuurongevoelig in een bepaalde range en reageren juist bij een bepaalde drempel (Hensel, 1981). Aangenomen wordt dat de lineaire neurons primair temperatuurdetectoren zijn, terwijl de niet-lineaire neurons meer een taak hebben in de schakeling van fysiologische signalen en reacties van het lichaam (Eisenman, 1972).

Het ruggemerg geeft temperatuursignalen door aan de hypothalamus (Hensel e.a., 1973), maar heeft daarnaast zelf ook een functie in de temperatuurgewaarwording, omdat bijvoorbeeld directe koeling van het ruggemerg tot onmiddellijk rillen leidt (Hensel e.a., 1973). Het ruggemerg bevat dus eveneens thermosensitieve receptoren.

2.3.3 Lichaams-thermoreceptoren

Het bestaan van dit soort receptoren is afgeleid van het feit dat sommige thermoregulatorische responsen niet verklaard konden worden door hypothalamus- en huidtemperatuur alleen. Verder is weinig bekend over dit soort receptoren. Vermoed wordt dat mogelijk receptoren aanwezig zijn in de bloedvaten (o.a. Bligh, 1961; Saltin e.a., 1968). Cranston e.a. (1978) kon het bestaan van receptoren in de bloedbaan juist weer niet aantonen. Ook in de buikholte worden thermoreceptoren vermoed (Rawson & Quick, 1970, 1971, 1976). Rawson en Quick (1970) toonden in dieren experimenteel aan dat verwarming van de buik leidde tot thermofysiologische reacties (toename in hijgen en daling hypothalamustemperatuur) die niet verklaard konden worden door de prikkeling van huid- en/of hypothalamus receptoren. Volgens hen moest het bestaan van diepe lichaamssensoren hiermee zijn aangetoond. Andere plaatsen in het lichaam waar mogelijk thermoreceptoren aanwezig zijn, zijn kniegewricht en longen (Hensel, 1981). In sommige gevallen is juist sprake van ander soort receptoren (o.a. baroreceptoren en chemoreceptoren), die mogelijk een temperatureffect hebben. Het meeste

onderzoek is echter uitgevoerd bij dieren en niet bij mensen, zodat de resultaten van dit soort onderzoek niet zomaar vertaald kunnen worden naar de humane fysiologie.

2.4 Effectoren

Nadat een verstoring van het thermofysiologisch evenwicht waargenomen is door de (thermo)receptoren zal het lichaam d.m.v. effectoren ingrijpen in de thermoregulatie. Een verstoring wil zeggen dat er een afwijking van de neutrale toestand plaatsvindt, zoals dat beschreven is in § 2.1. In de navolgende paragrafen zal dieper worden ingegaan op de effecten van wijzigingen in temperatuur of comfort. Hier worden alleen de mogelijke (fysiologische) reacties op temperatuursensaties besproken.

De eerste effector is vasculaire reactie, nl. vasodilatatie of vasoconstrictie van de huidvaten waardoor respectievelijk warmte via het bloed aan de omgeving wordt afgegeven of de warmte juist in het lichaam wordt vastgehouden (Hensel, 1981). Dit is een belangrijke effector in de comfortrange van mensen.

Ten tweede is het op gang komen van de zweetsecretie een effectieve methode warmte van het lichaam af te voeren en mensen thermisch comfortabel te houden. Mogelijke drives voor het op gang brengen van de zweetsecretie zijn een verhoging van de centrale temperatuur, maar ook een verhoging van de huidtemperatuur (Libert e.a., 1979).

Tenslotte naast de zweetsecretie kan ook het metabolisme een rol spelen in het handhaven van de warmtebalans tijdens een verstoring van de thermoregulatie. Stolwijk en Hardy (1966) beschreven de relatie tussen een verhoging van het metabolisme door koudeblootstelling enerzijds en de kerntemperatuur en de huidtemperatuur anderzijds als volgt:

$$\Delta M = 70 (36,6 - T_{ty})(34,1 - \bar{T}_h) \quad (W)$$

met ΔM = verhoging metabolisme
 T_{ty} = tympanische temperatuur
 \bar{T}_h = gemiddelde huidtemperatuur
 70 = constante
 36,6 = neutrale kerntemperatuur
 34,1 = neutrale huidtemperatuur

Eén van de bekendste metabole reacties tijdens koude is het rillen, waarbij de spieractiviteit voor een verhoging van het metabolisme zorgt.

Naast deze fysiologische reacties kunnen mensen ook hun gedrag aanpassen op grond van de ervaren temperatuursensaties. Gedrag is daarom één van de belangrijkste effectoren. Hierbij moet gedacht worden aan veranderingen van kledingisolatie, aanpassen van omgevingstemperatuur, aanpassen van de bewuste lichamelijke activiteit (anders dan het onwillekeurig rillen). Deze effectoren moeten het lichaam in staat stellen een comfortabele lichaamstemperatuur te handhaven.

In de volgende paragrafen zal worden besproken wat voor effecten koude, zowel centraal als lokaal, op het lichaam heeft.

2.5 Comfort en koude

2.5.1 Inleiding

Een veel gebruikt begrip bij koude is de windchill of windchill equivalente temperatuur. De meest gebruikte schalen zijn die van Siple en Passel (1945) en Steadman (1971). Met windchill wordt m.b.v. een index aangegeven wat het warmteverlies van de blote huid is, gegeven de windsnelheid en omgevingstemperatuur. De windchill index (WCI) geeft het koelend vermogen van de wind aan voor verschillende combinaties van luchttemperatuur en windsnelheid ten opzichte van een gefixeerde huidtemperatuur van 33°C. Met behulp van de WCI kan het bevroeringsgevaar voor de onbedekte huid worden weergegeven. De koelings-curve wordt berekend in $W \cdot m^{-2}$, die vervolgens weer als een WCET (windchill equivalente temperatuur) kan worden weergegeven. De beide formules worden hieronder weergegeven:

$$WCI = (12,12 + 11,60 \cdot \sqrt{v - 1,16} \cdot v) \cdot (33 - t) \quad (W \cdot m^{-2})$$

$$WCET = \frac{[33 - (12,12 + 11,60 \cdot \sqrt{v - 1,16} \cdot v) \cdot (33 - t)]}{(12,12 + 11,60 \cdot \sqrt{v - 1,16} \cdot v_0)} \quad (^\circ C)$$

met WCI als windchill index
 WCET als windchill equivalente temperatuur
 v als windsnelheid in $m \cdot s^{-1}$
 v_0 als referentiewindsnelheid in $m \cdot s^{-1}$
 t als temperatuur van de omgeving in $^\circ C$.

Een temperatuurervaringsscore van bijvoorbeeld "zeer koud" komt overeen met een windchill van 1160 $W \cdot m^{-2}$. Zo'n warmteverlies treedt op bij $-35^\circ C$ en nauwelijks wind (minder dan $0,2 m \cdot s^{-1}$ wind), maar ook bij $0^\circ C$ en $7 m \cdot s^{-1}$ wind en $3^\circ C$ en $20 m \cdot s^{-1}$ wind. In deze gevallen is sprake van een WCET van ongeveer $-12^\circ C$. Nadeel van deze schaal is dat met stralingstemperatuur geen rekening gehouden wordt.

Steadman (1971) berekent de WCET op grond van de warmtebalans van het lichaam en is mede daardoor goed gerelateerd aan temperatuurgevoel. De temperatuursensatie is afhankelijk van de WCET, duur van de blootstelling en de hoeveelheid isolatie van de blote huid. Steadman betrok in zijn WCET wel het effect van zonnestraling en relatieve luchtvochtigheid en kwam met een referentiewindsnelheid van $2,0 m \cdot s^{-1}$ tot de volgende Tabel.

Tabel IV Steadman's windchill equivalente temperaturen.

Bf	Wind- snelheid	Luchttemperatuur (°C)																
		+8	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24
2	2	+8	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24
	3	+7	+5	+3	+1	-2	-4	-6	-8	-11	-12	-15	-17	-19	-21	-23	-25	-27
4	6	+6	+4	+2	-1	-4	-6	-9	-10	-13	-15	-18	-20	-22	-24	-27	-28	-31
	8	+5	+3	0	-3	-5	-8	-11	-12	-16	-18	-21	-23	-26	-28	-30	-32	-34
6	10	+4	+2	-1	-4	-7	-10	-13	-15	-18	-21	-23	-27	-29	-32	-34	-36	-37
	12	+3	+1	-2	-6	-9	-12	-15	-17	-20	-23	-27	-29	-32	-34	-37	-38	-41
7	14	+2	0	-3	-7	-10	-13	-16	-18	-22	-25	-29	-32	-35	-37	-40	-42	-44
	16	+2	-1	-4	-8	-11	-14	-18	-19	-23	-27	-31	-34	-37	-39	-42	-44	-46
8	18	+1	-2	-5	-9	-12	-16	-19	-21	-25	-29	-33	-37	-39	-42	-44	-47	-48
	20	0	-3	-5	-9	-13	-16	-19	-22	-26	-30	-34	-37	-41	-43	-46	-48	-51

Een belangrijk deel van het subjectieve temperatuur- en comfort-oordeel zal worden bepaald door de temperatuur en het gevoel van de extremiteiten en blote huddelen. Vooral van belang voor comfort tijdens koude omstandigheden zijn de temperatuur van het gezicht (Crawshaw e.a., 1975) en van de extremiteiten (Heus e.a., 1995). Zoals eerder (§ 2.3) vermeld, wordt koude voornamelijk door thermoreceptoren (koudereceptoren) in de huid waargenomen (Benzinger, 1969) en is dus het gevoeligst op die plaatsen waar de huid onbedekt is.

In de bescherming tegen hypothermie zal vasoconstrictie van de extremiteiten optreden (Houdas & Ring, 1982). De extremiteiten spelen daarom een belangrijke rol in het handhaven van de centrale lichaamstemperatuur. Met de vasomotorische eigenschappen van de periferie is het dus mogelijk de thermoregulatie te beïnvloeden en zodoende het comfortgevoel van het lichaam te regelen. Verwarming van de extremiteiten bijvoorbeeld kan leiden tot een comfortabel gevoel in de kou, waardoor mensen niet alleen fysiek (betere handvaardigheid) (Heus e.a., 1995), maar ook mentaal beter kunnen functioneren (Provins, 1966).

2.5.2 Comfort en het koude lichaam

De koudereceptoren zijn grotendeels in de huid gelokaliseerd en een gevoel van koude zal vooral ontstaan wanneer de gemiddelde huidtemperatuur lager is dan de neutrale waarde (ca. 33°C). Indien de huidtemperatuur veel lager is dan die neutrale waarde zullen ook de gevoelens van discomfort toenemen. Als alleen bepaalde plaatsen koud zijn, maar de invloed op de gemiddelde huidtemperatuur slechts gering is, dan zal alleen sprake zijn van lokaal discomfort (Hensel, 1981). Langdurige blootstelling aan koude zal de algehele koudesensatie doen toenemen en de prestaties op taken die continu aandacht vereisen doen afnemen (Enander, 1987). Omdat de aandacht minder op de mentale taak gericht is, maar meer op het discomfort, wordt het moeilijker fouten tijdens de mentale taak eventueel te corrigeren (Enander, 1987).

2.5.3 Comfort en de koude periferie

Koude handen en/of voeten kunnen een maskerende invloed hebben op de koudesensatie van het gehele lichaam. Een gevoel van extreem koude handen, al of niet gepaard gaand met pijnsensaties, kan het gevoel geven dat het gehele lichaam koud is, terwijl berekeningen aangeven dat er op basis van de warmtebalans nog geen enkel probleem is (Hensel, 1981). Een voorbeeld is slapen in de kou. Dat kan verhinderd worden door koude voeten, terwijl de rest van het lichaam warm genoeg is (Havenith & Heus, 1989). Het belang van de periferie in de comfortge waarwording was reeds door Hardy (1961) aangegeven. Hij vond dat wanneer mensen plotseling in een koude omgeving werden geplaatst, rillen al begon voordat de afferente zenuwen kouder werden en de temperatuur van de zenuwen dus niet de oorzaak was van het rillen. In zulke gevallen moet de thermoregulatie wel reageren op grond van perifere stimulatie van de receptoren, die overigens hun signalen doorgeven via de afferente zenuwen. Discomfort door koude wordt volgens Hardy (1961) vooral ervaren door de onderste extremiteiten. Dat wordt ook onderstreept door Crawshaw e.a. (1975), die vond dat de koudegevoeligheid in belangrijke mate door gezicht en de onderbenen wordt bepaald (zie ook Tabel III in § 2.2.1).

Zoals al eerder bleek (§ 2.3.1) is het gezicht een belangrijk instrument voor de koude-sensatie, omdat de huid van het gezicht meestal onbedekt is en het gezicht zeer gevoelig is voor koude prikkels (LeBlanc e.a., 1976). Gezichtstemperaturen beneden de 16°C leveren een aanzienlijk discomfort op, terwijl er in het gebied tussen de neutrale waarde (33°C) en de 16°C, maar een geringe daling in het comfort is te zien (LeBlanc e.a., 1976) (Fig. 8).

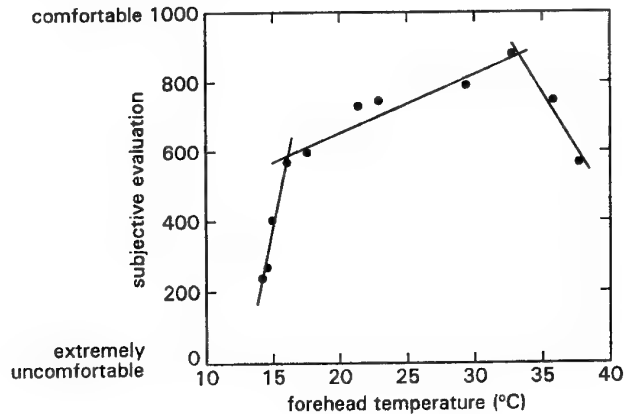


Fig. 8 De relatie tussen huidtemperatuur van het voorhoofd en de subjectieve gewaarwording (LeBlanc e.a., 1976).

2.6 Comfort en warmte

2.6.1 Inleiding

In een warme omgeving speelt het comfort een belangrijke rol in het functioneren van mensen. Tot een bepaalde temperatuur is door het verminderen van de kledingisolatie het comfort nog te regelen. Dat houdt echter snel op. Bij een temperatuur tussen 28°C en 30°C en windstilte voelt een naakte mens zich in rust nog comfortabel (Houdas & Ring, 1982). Als de temperatuur dan verder omhoog gaat zal het discomfort langzaam maar zeker toenemen en zijn geen gedragsmaatregelen meer te nemen om het comfort in stand te houden. Thermisch comfort reflecteert in feite de toestand van het gehele thermoregulatorische systeem en niet de toestand van de afzonderlijke thermische receptoren in het lichaam (Precht e.a., 1973). Comfort zal ook een belangrijke invloed hebben op het verdere functioneren van de mens bij extreme hitte. De hitte kan gezien worden als een extra taak (Havenith, 1995), wat uiteindelijk betekent dat men minder goed zal gaan presteren op allerlei primaire taken (Wilkinson e.a., 1964; Colquhoun & Goldman, 1972; Poulton & Edwards, 1974). Bovendien wordt het lichamelijke prestatievermogen sterk beïnvloed door de geringere mogelijkheden tot warmte-afgifte. Matige warmte kan soms een gunstig effect hebben op het (mentaal) functioneren (Provins, 1966) en dat geldt met name voor eenvoudige taken die weinig aandacht vragen.

2.6.2 Comfort en het warme lichaam

De warmtereceptoren bevinden zich meer in de kern van het lichaam dan in de huid. Een verhoogde kerntemperatuur zal daarom een grotere invloed hebben op de temperatuur-

sensatie van het lichaam dan een verhoging van alleen de huidtemperatuur. Een warme huid daarentegen kan zeker van invloed zijn op het discomfort, omdat wel degelijk thermoreceptoren in de huid aanwezig zijn. De gevoeligheid en het aantal warmtesensoren in de huid verschillen lokaal sterk (Tabellen II en III). Ook nu is het hoofd met name het gevoeligst voor warmtegewaarwording.

In de gemiddelde lichaamstemperatuur in een warme omgeving zijn zowel de kerntemperatuur als de gemiddelde huidtemperatuur (in mindere mate) van invloed op de temperatuur-gewaarwording. De relatie tussen discomfort en gemiddelde lichaamstemperatuur is lineair, maar bij een lichaamstemperatuur boven de 38°C lijkt de gevoeligheid voor discomfort waarneembaar te verminderen (Gonzalez e.a., 1978). Deze verminderde gevoeligheid is vooral toe te schrijven aan de invloed van de kerntemperatuur, want hoge huidtemperaturen van meer dan 42°C laten juist een proportionele toename in discomfort zien (Gonzalez, 1981; Winslow & Herrington, 1949).

2.6.3 Comfort en warme extremiteiten

De extremiteiten zijn een uitstekend hulpmiddel om een lichaam dat warm en oncomfortabel aanvoelt op een efficiënte manier te beïnvloeden. Door koeling van de extremiteiten (b.v. de handen) is het mogelijk langduriger arbeid onder hete omstandigheden uit te voeren (House, 1994). In dit soort onderzoek is de kerntemperatuur de indicator of arbeid al dan niet gecontinueerd kan worden. Hoewel (kern)temperatuur een belangrijke rol speelt in de ervaring van comfort en temperatuur (zie ook § 4.1.1) is slechts weinig onderzoek bekend dat een directe relatie legt tussen algeheel comfort en temperatuursensatie als gevolg van handkoeling. Om een beter inzicht te krijgen in dit soort fenomenen is het noodzakelijk de mogelijkheden van beïnvloeding van thermisch comfort door lokale verandering van huidtemperatuur beter te onderzoeken.

3 COMFORTSCHALEN

3.1 Inleiding

Tot de zestiger jaren werd thermisch comfort kwantitatief vastgelegd door gebruik te maken van een categorische schaal met de volgende woorden:

koud—koel—lichtelijk koel—comfortabel—lichtelijk warm—warm—heet

Met als doel statistische analyses te kunnen doen, zijn aan deze schalen waarden van 1 tot 7 toegekend (Gagge, 1981), of om onderscheid te maken tussen warm en koud van -3 tot +3 met 0 als neutrale waarde.

Bij de keuze van een bepaalde comfortschaal moet rekening gehouden worden met het aantal te onderscheiden stappen op de schaal. Bekende schalen variëren van een 3-puntsschaal tot wel 14 punten op de schaal. De gevoeligheid die mensen hebben is vaak niet in staat onderscheid te maken in zoveel stappen, terwijl 3-puntsschalen juist weer te beperkt kunnen

zijn. De meest gebruikt schalen zijn daarom 7-puntsschalen (Tabel V) zoals de ASHRAE- en de Bedford-schaal (Cena & Clark, 1981).

Tabel V De ASHRAE en Bedford Comfortschalen.

ASHRAE Temperatuurschaal			Bedford (Dis)comfortschaal		
score	omschrijving		score	omschrijving	
	Engels	Nederlands		Engels	Nederlands
+3	hot	heet	7	much too warm	veel te warm
+2	warm	warm	6	too warm	te warm
+1	slightly warm	lichtelijk warm	5	comfortably warm	comfortabel warm
0	neutral	neutraal	4	comfortable	comfortabel
-1	slightly cool	lichtelijk koel	3	comfortably cool	comfortabel koel
-2	cool	koel	2	too cool	koud
-3	cold	koud	1	much too cool	veel te koud

De ASHRAE-schaal staat dicht bij onze belevingswereld, omdat 0 neutraal aangeeft, de negatieve kant van de schaal koud is en de positieve kant warm aangeeft. De Bedford schaal daarentegen spreekt van comfortabel als neutrale middenstand, terwijl neutraal lang niet altijd comfortabel hoeft te zijn.

Een bijkomend probleem met beide schalen in Nederland is, dat ze vertaald zijn uit het Engels, waarbij het moeilijk is exacte vertalingen van de oordelen te vinden en het gebruik van bepaalde woorden kan onduidelijkheid scheppen in de uiteindelijke uitkomsten.

Ook culturele verschillen kunnen soms tot niet eensluidende oordelen leiden. Een duidelijk voorbeeld hiervan is dat Europeanen en Noord Amerikanen spreken van een "warm onthaal", terwijl bewoners van tropisch Afrika het juist over een "koel onthaal" hebben (Cena & Clark, 1981), maar daarmee op dezelfde gastvrijheid doelen.

Voor fysiologen voldeden dit soort indelingen niet in alle gevallen, omdat temperatuur niet altijd aan comfort gebonden is, maar meer aan de thermoregulatorische responsen op de fysische omgeving. Winslow e.a. (1937) introduceerden daarom de onderverdeling op basis van zintuiglijke informatie: aangenaam—onaangenaam—zeer onaangenaam. Deze indeling is geheel ontdaan van temperatuurinformatie. Later veranderde Gagge e.a. (1967) de indeling in comfortabel—lichtelijk oncomfortabel—zeer oncomfortabel. De reden hiervoor was dat lokale temperatuursensaties (warm of koud) aangenaam of onaangenaam kunnen zijn afhankelijk van de gemiddelde lichaams- en/of huidtemperatuur. Hetzelfde geldt echter voor de indeling van Gagge, want lokale temperatuursensaties kunnen ook comfortabel of oncomfortabel zijn afhankelijk van de uitgangspositie en wijze van vraagstelling. Dit probleem is al eerder geschetst en is moeilijk weg te nemen, omdat je met subjectieve maten te maken hebt.

Zoals uit het voorgaande al bleek zijn er diverse comfortschalen. Daarnaast zijn er ook diverse temperatuur- en vochtsensatieschalen en pijnsensatieschalen, die ook iets over het comfort zeggen. In de volgende paragrafen zullen keuzes gemaakt worden over de schalen die in de toekomst gebruikt gaan worden.

3.2 Temperatuur

Er worden vele temperatuurschalen gehanteerd, die niet eenduidig zijn. Zo zijn er voor temperatuur 17-puntsschalen (Havenith & Van Middendorp, 1985; Hollies & Goldman, 1977), 9-puntsschalen (Thellier e.a., 1994), 7-puntsschalen (NEN-ISO 7730, 1990) etc. Daarnaast bestaan er aparte comfortschalen, maar ook gecombineerde temperatuur- en comfortschalen. Verder zijn er schalen voor vochtigheidsgevoel (Van de Linde e.a., 1989; Heus e.a., 1992) en pijn (Van de Linde e.a., 1991; Heus & Daanen, 1993). Met de komst van ISO 10551 (1992) worden temperatuur en comfort als aparte variabelen beschouwd. De voorgestelde temperatuurindeling, die in het vervolg beter kan worden aangehouden om uniformiteit in de resultaten te waarborgen, staat vermeld in Tabel VI.

Tabel VI Temperatuur- en comfortsensaties volgens ISO 10551.

score	temperatuur	score	comfort
3	heet	1	comfortabel
2	warm	2	enigszins oncomfortabel
1	enigszins warm	3	oncomfortabel
0	neutraal	4	zeer oncomfortabel
-1	enigszins koel		
-2	koel		
-3	koud		

3.3 Comfort

Hoewel de diversiteit wat minder groot is dan bij temperatuurschalen zijn er ook voor comfort verschillende schalen in omloop. Mower (1976) kent bijvoorbeeld de volgende drie gradaties aan comfort toe: "aangenaam—neutraal—onaangenaam". Maar de schaal wordt soms ook uitgebreid met "zeer aangenaam" en "zeer onaangenaam". In ISO 10551 (1992) wordt gesproken van: "comfortabel—enigszins oncomfortabel—oncomfortabel—zeer oncomfortabel" (Tabel VI). Aan deze laatste beschrijvingen van comfort zal in dit rapport ook verder worden geconformeerd. Soms heeft dat de implicatie dat bestaande beschrijvende modellen van comfort aan deze indeling zullen moeten worden aangepast. In die gevallen zal ervoor gekozen worden om comfort als nulpunt te definiëren. De lineaire ISO-schaal zal tevens worden uitgebreid met tussenliggende waarden en "extreem oncomfortabel" om een zo groot mogelijk oplossend vermogen van de schaal te hebben [0 (=comfortabel); 1 2 (=enigszins oncomfortabel); 3 4 (=oncomfortabel); 5 6 (=zeer oncomfortabel); 7 8 (=extreem oncomfortabel)].

Pijn

Een bijzondere vorm van (dis)comfort is pijn. Pijn suggereert altijd een behoorlijke mate van discomfort en kan in zekere zin worden beschouwd als een verdergaande onderverdeling van onaangenaam. De nu gebruikte pijnschalen, die lopen van "geen pijn" (0) tot "ernstige pijn" (4) (Tanaka e.a., 1985) of "geen enkele pijn" (0) tot "ondraaglijke pijn" (10) (Heus e.a.,

1995) passen nu niet in het voorstel zoals dat in ISO 10551 (1992) is voorgesteld door alleen maar te vragen naar de tolerantie van een sensatie, maar niet naar de werkelijke pijnsensatie. De keuzemogelijkheid of iets ondraaglijk is, wordt in het ISO-voorstel eveneens achterwege gelaten en dat is alleen al uit ethische overwegingen niet toelaatbaar.

3.4 Vochtigheid

Voor vochtigheid wordt gebruikgemaakt van een schaal die loopt van “droog” (0) tot “doorweekt” (10) (Havenith & Van Middendorp, 1985; Van de Linde e.a., 1989), maar ook één die loopt van “zeer droog” (2) tot “drijfnat” (14). Nielsen en Endrusick (1990) gebruikten een schaal waarin gevraagd werd hoe de huid aanvoelde. Deze schaal liep van “droger dan normaal” (1) tot “druipend zweet over het gehele lichaam” (8).

Tabel VII Voorgestelde subjectieve sensatieschalen.

temperatuur	comfort	pijn	vochtigheid
10			
9			
8 zeer heet			
7			
6 heet			
5			5
4 warm			4 zeer droog
3			3
2 enigszins warm			2 droog
1			1
0 niet warm, niet koud	0 comfortabel	0 geen enkele pijn	0 neutraal
-1	1	1	-1
-2 enigszins koel	2 enigszins oncomfortabel	2 een beetje pijn	-2 licht vochtig
-3	3	3	-3
-4 koel	4 oncomfortabel	4 nogal wat pijn	-4 vochtig
-5	5	5	-5
-6 koud	6 zeer oncomfortabel	6 veel pijn	-6 nat
-7	7	7	-7
-8 zeer koud	8 extreem oncomfortabel	8 erg veel pijn	-8 drijfnat
-9		9	-9
-10		10	

3.5 Conclusie

Er zijn vele verschillende schalen in omloop om subjectieve sensaties te rangschikken. Voorgesteld wordt om in het vervolg verder uit te gaan van een ontkoppelde temperatuur- en comfortschaal (ISO 10551, 1992). De temperatuursensatieschaal uit die norm is op een aantal punten aangepast om zoveel mogelijk bij de belevingswereld van mensen aan te sluiten. De schaal loopt van -10 tot $+10$, met 0 als neutrale temperatuursensatie, d.w.z. dat de schaal uit de ISO-norm is uitgebreid met "zeer koud" en "zeer heet". De schaal is tevens uitgebreid met tussenwaarden om mensen ook te laten kiezen tussen bijvoorbeeld "koel" en "koud". Voor comfort is voor een identieke aanpak gekozen. De oorspronkelijke schaal is tweemaal zo groot gemaakt om ook de mogelijkheid open te laten om mensen een score te laten geven die precies tussen twee beschrijvingen in ligt. Bovendien is extreem oncomfortabel aan de schaal toegevoegd om de mogelijkheid open te laten een zeer onaangename toestand te beschrijven.

Voor het vastleggen van pijn en vochtigheid bestaan nog geen internationale normen. Daarom wordt voorgesteld de pijnschaal van "geen enkele pijn" (0) tot "ondraaglijke pijn" (10) te laten lopen. De vochtigheidsschaal loopt van "drijfnat" (-9) tot "zeer droog" (5). Beide schalen kennen evenals de temperatuursensatieschaal en de comfortschaal ook tussenliggende waarden bij de ervaren lichaamstoestand en 0 als neutrale uitgangspositie. Op die manier is een eenduidige set van subjectieve sensatieschalen gecreëerd die thermisch comfort kunnen beschrijven. De subjectieve sensatieschalen zijn nog eens weergegeven in Tabel VII.

4 COMFORT MODELLEN

4.1 Inleiding

Computermodellen die de thermoregulatie van de mens simuleren onder verschillende omgevingsinvloeden worden steeds weer aangepast of opnieuw ontwikkeld. Het doel van dat soort modellen is op basis van de verrichte activiteiten en de omgevingsfactoren een voorspelling te maken van de huidtemperatuur, huiddoorbloeding, zweetregulatie en kerntemperatuur. Daarnaast is de interpretatie van deze fysiologische factoren naar temperatuursensatie en comfort erg belangrijk.

De diversiteit aan gebruikte schalen maakt het eveneens moeilijk eenduidige modellen op te stellen. Derhalve zijn er ook veel verschillende voorspellende modellen voor temperatuur en comfort. Ook zijn er voorspellende modellen voor pijn van de extremiteiten opgesteld. Tenslotte is het van belang te weten of een model op basis van fysiologische parameters voorspelt of op basis van klimaatparameters, m.a.w. staat de mens of de omgeving centraal.

4.1.1 Temperatuursensatie

Een van de eerste modellen voor koude- en warmtesensatie is opgesteld door Stevens en Stevens (1960). Zij hebben zowel voor koude als warmte een apart model gegenereerd met

als uitgangspunt de algemene psychofysische wet van "magnitude estimation" (intensiteit schatting), die luidt:

$$\psi = k(\varphi - \varphi_0)^n$$

met ψ als de subjectieve intensiteit
 φ als de stimulussterkte (b.v. absolute temperatuur in K)
 φ_0 als de neutrale waarde, d.w.z. die waarde die de fysieke nulwaarde gelijk stelt aan de subjectieve nulwaarde (in dit geval ongeveer 32°C)
 k, n als constanten.

Het warmtemodel luidt als volgt:

$$W = M(T_k - 305,7)^{1,6}$$

met W is de waarde voor de subjectief ervaren warmtesensatie
 T_k is de temperatuur van de stimulus in Kelvin
 M is een constante
 $305,7$ is een constante, die gelijk is aan de fysiologische nulwaarde.

Het koudemodel luidt als volgt:

$$K = M'(304,2 - T_k)^{1,0}$$

met K = de waarde voor de subjectief ervaren koudesensatie
 T_k = de temperatuur van de stimulus in Kelvin
 M' = een constante
 $304,2$ = een constante, die gelijk is aan de fysiologische nulwaarde.

De grafische representatie van deze vergelijkingen wordt weergegeven in Fig. 9.

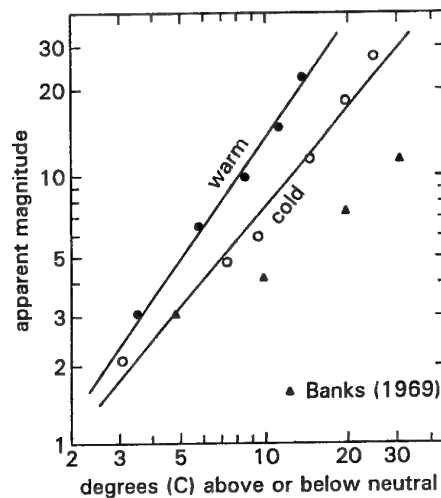


Fig. 9 De toename in koude- en warmtesensatie t.o.v. de fysiologische neutrale waarde (Banks, 1969).

Deze grafiek is op een andere manier totstandgekomen dan het scoren van subjectieve sensaties d.m.v. een bekende schaal zoals eerder genoemd in § 3.5. De methode van "magnitude estimation" werkt als volgt: een persoon krijgt een stimulus aangeboden, waaraan door de onderzoeker een getal wordt toegekend. Vervolgens moet de persoon alle volgende stimuli relateren aan de eerste stimulus en er een getalwaarde aan toekennen (Nowell Jones, 1974).

Een probleem met het model van Stevens en Stevens (1960) is dat koude (beneden de fysiologisch neutrale waarde van 32°C) en warmte (boven de fysiologisch neutrale waarde van 32°C) niet in één vergelijking kunnen worden gerepresenteerd en dat weer een andere schaal wordt gebruikt om thermische sensatie weer te geven. Later werden deze bevindingen nog eens gerepliceerd door Banks (1969), maar hij vond dat hij er eveneens in geslaagd was een model te ontwikkelen dat subjectieve temperatuursensatie over de volledige thermische range beschrijft. Dit model luidt:

$$\psi = k e^{\alpha \varphi}$$

met: ψ als de subjectieve intensiteit

φ als de stimulussterkte (b.v. absolute verschiltemperatuur van neutraal in K)

k een constante die 2,56 bedraagt

α een constante die 0,0425 bedraagt.

Aangezien het model van Banks (1969) volgens hemzelf niet in tegenspraak is met de modellen van Stevens en Stevens (1960) en beide gebaseerd zijn op de algemene psychofysische wet, ligt het voor de hand het model van Banks als uitgangspunt te nemen om in het vervolg subjectieve temperatuursensatie te beschrijven in termen van lichaams- en omgevingstemperatuur. Indien zijn formule wordt toegepast blijkt toch een onderschatting te bestaan t.o.v. de modellen van Stevens en Stevens (1960).

Beide modellen beschrijven lokale temperatuursensaties en met de stimulussterkte wordt in beide gevallen de afwijking van de neutrale lokale huidtemperatuur bedoeld. De subjectieve sensatie wordt als een geschatte intensiteit aangegeven in tegenstelling tot de meeste gebruikte categorieschalen. De categorieschalen geven een eindige set getallen weer of een set van bijvoeglijke naamwoorden waarbij proefpersonen volgens Stevens (1974) gedwongen worden zich te beperken tot de schaal en daar niet buiten kunnen gaan. De geschatte intensiteit kent die beperking niet, omdat proefpersonen zelf een waarde aan de intensiteit kunnen toekennen. Anderson (1974) vindt overigens dat de eindige categorieschalen een juiste benaderingswijze zijn van subjectieve oordelen. Dit is gevalideerd voor het schatten van gewicht en ook voor andere subjectieve maten moet dat volgens hem gelden (Anderson, 1972). Hierdoor moet één van beide benaderingswijzen onjuist zijn, omdat beide benaderingen niet lineair met elkaar gerelateerd zijn. Anderson zegt dat voor Stevens' geschatte intensiteit de basis voor validatie ontbreekt, wat door Stevens (1971) zelf indirect wordt onderschreven met de woorden dat het een kwestie van opinie is, welke theorie aangehangen wordt. Overigens blijft volgens Anderson (1972) de mogelijkheid nog steeds open dat subjectieve sensatie beschreven wordt door een powerfunctie, maar dan zal een dergelijke functie goed gevalideerd moeten worden. Subjectief geschatte intensiteit in het model van Stevens en Stevens (1960) kan mogelijk daarom vervangen worden door subjectieve sensatie, waardoor het model toch bruikbaar blijft.

Om internationaal dezelfde subjectieve temperatuur- en comfortschaal te gaan gebruiken wordt verwezen naar de al eerder genoemde ISO 10551 (1992). Dat maakt het dan mogelijk om eveneens een goed model op te stellen dat zowel de thermofysiologische toestand als het comfort (globaal comfort) van de mens als geheel voorspelt, i.t.t. het model van Banks dat alleen lokale sensaties voorspelt. De meeste modellen beschrijven (thermisch) comfort als een soort temperatuur, waarbij men een subjectieve thermische sensatie heeft. Voorbeelden van dergelijke modellen zijn: de subjectieve temperatuur (T_{sub}), de comforttemperatuur (T_{co}) en de voorkeurstemperatuur (T_{pref}). De eerste twee indices worden voornamelijk bepaald aan de hand van de omgevingsparameters en de laatste aan de hand van fysiologische parameters. De subjectieve temperatuur (McIntyre, 1981) wordt berekend op de volgende wijze:

$$T_{\text{sub}} = 0,56T_a + 0,44T_r \quad (v < 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$$

$$T_{\text{sub}} = \frac{0,44T_r + 0,56[5 - (10v)^{0,5}(5 - T_a)]}{[0,44T_r + 0,56(10v)^{0,5}]} \quad (v < 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$$

met T_{sub} = subjectieve temperatuur
 T_a = luchttemperatuur (K)
 T_r = stralingstemperatuur (K)
 v = lichtsnelheid ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

De grafische representatie hiervan wordt weergegeven in Fig. 10.

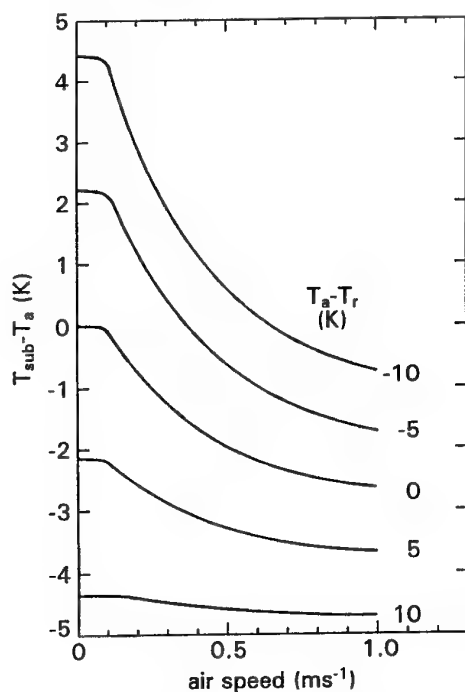


Fig. 10 Het verschil tussen de subjectieve temperatuur en de luchttemperatuur uitgezet tegen de windsnelheid (McIntyre, 1981).

De gewenste comforttemperatuur (Humphreys, 1981) van de omgeving kan als volgt worden weergegeven:

$$T_{co} = 0,0077 T_{ou}^2 + 19,8 \quad (r=0,66)$$

De vergelijking kan significant verbeterd worden door er de gemiddelde dagtemperatuur van de heetste maand aan toe te voegen. De formule wordt dan:

$$T_{co} = 0,0065 T_{ou}^2 + 0,32 T_h + 12,4 \quad (r=0,77)$$

met T_{co} = comforttemperatuur in °C

T_{ou} = buitentemperatuur in °C

T_h = gemiddelde dagtemperatuur van de heetste maand in °C.

Meer variantie kan nog worden verklaard met de factor "land van herkomst" (Humphreys, 1981). Inwoners uit Rusland bijvoorbeeld hebben een 2°C lagere comforttemperatuur, terwijl mensen uit de VS juist weer 2°C boven de lijn liggen (Humphreys, 1981). Er zijn echter te weinig data uit andere landen om deze factor aan de vergelijking toe te voegen.

De voorkeurstemperatuur (Cabanac e.a., 1972) is een temperatuur van de handen waarbij mensen zich zo comfortabel mogelijk voelen. Cabanac e.a. (1972) maakten gebruik van het feit dat het (thermisch) comfort gemakkelijk door de extremiteiten beïnvloed kan worden door de extremiteiten een afwijkende temperatuur te geven van het in een thermostaatbad gelegen lichaam. De formule voor de voorkeurstemperatuur luidt:

$$T_{pref} = - 0,3 T_b (T_{es}-36,3) + 44$$

met T_{pref} = voorkeurstemperatuur in °C

T_b = badtemperatuur in °C

T_{es} = slokdarmtemperatuur in °C.

Andere relaties zijn onderzocht, maar die leverden geen betere fit voor de resultaten op. Daarom hebben zij gekozen voor een lineaire relatie, omdat die het eenvoudigst is om het verband van de voorkeurstemperatuur met de kern- en badtemperatuur weer te geven. De badtemperatuur is hier de omgevingstemperatuur van het lichaam en die is ongeveer gelijk aan de huidtemperatuur.

Duidelijk is in ieder geval dat het comfort van mensen sterk wordt beïnvloed door de kerntemperatuur en de omgevingstemperatuur, die wordt waargenomen door de blote huddelen. De gemiddelde huidtemperatuur is wat ondergeschikt, want vooral lokale huidtemperaturen spelen een belangrijke rol. Dat geldt dan met name voor lokaal (dis)comfort (Hensel, 1981). Nadelen van beschrijvingen in termen van temperatuur zijn dat mensen zich moeten kunnen inleven in temperatuur als een getal. Het spreekt meer tot de verbeelding als thermisch gevoel kan worden weergegeven in termen van koud en warm.

Dat is ook de benaderingswijze van Thellier (1995), die met "global sensation" op basis van de huidtemperatuur een maat voor het thermisch comfort van het gehele lichaam beschrijft. De thermische sensatie wordt weergegeven in een beschrijving van het thermisch gevoel van het lichaam. De formule die wordt toegepast luidt:

$$S_{\text{global}} = 0,0183 T_h^3 - 1,6857 T_h^2 + 52,27 T_h - 548,58$$

met T_h = huidtemperatuur in °C
 S_{global} = temperatuursensatie voor het gehele lichaam.

Deze formule is gebaseerd op de getallen uit Tabel VIII.

Tabel VIII De relatie tussen temperatuursensaties voor het gehele lichaam en de gemiddelde huidtemperatuur naar Thellier (1995).

sensation →	very cold (-3)	cold (-2)	slightly cold (-1)	neutral (0)	slightly warm (+1)	warm (+2)	very warm (+3)
when T_h is	< 29,8	29,8 – 31,6	31,6 – 32,9	32,9 – 34,2	34,2 – 34,6	34,6 – 35,4	> 35,4

Deze waarden zijn niet zozeer op de individuele mens aangepast, maar vinden hun benadering in de ervaring van het binnenklimaat. De oorsprong van deze indeling ligt in het comfortmodel van Fanger (1970) en het fysiologisch model van Stolwijk (1971). Bij narekening van de getallen blijkt de constante niet $-548,58$, maar $-546,58$ te zijn. Een nadeel van deze benadering is dat alleen de ervaring van het binnenklimaat wordt beschreven en niet gevalideerd is voor extremere klimaten.

Havenith en Van Middendorp (1985) hebben een beschrijvend model ontwikkeld voor het thermisch gevoel voor het gehele lichaam onder alle klimaten. Zij beschrijven de temperatuursensatie niet als een functie van alleen de huidtemperatuur, zoals Thellier (1995) dat doet, maar als een lineaire functie van de kerntemperatuur, de temperatuur van de extremiteiten, de relatieve vochtigheid van de huid en de geleverde arbeid. De formule luidt:

$$T_{\text{sens}} = - 29,8 + 0,672 \cdot T_{\text{extr}} + 0,047 \cdot RH_h + 0,999 \cdot T_{\text{rect}} + 0,344 \cdot \text{arbeid}$$

met T_{sens} = temperatuursensatie voor het gehele lichaam
 T_{extr} = temperatuur van de extremiteiten in °C
 RH_h = relatieve vochtigheid van de huid in %
 T_{rect} = rectaal temperatuur in °C
 arbeid heeft de waarde 1 bij arbeid, 0 bij rust en -1 bij rust en wind.

De regressie-analyse toonde aan dat wanneer de temperatuur van de extremiteiten en de kern zijn opgenomen, de gemiddelde huidtemperatuur niets meer toevoegt. Kerntemperatuur (hier rectaaltemperatuur) speelt een belangrijke rol in de beleving van het thermisch comfort. De arbeidsvariabele is wel heel summier gedefinieerd in deze relatie en dat vraagt om verdere uitwerking, maar voegt ook slechts 0,5% aan de verklaarde variantie (Havenith & Van Middendorp, 1985) toe en kan daarom na aanpassing van de factoren voor de andere variabelen eventueel worden weggelaten. Een andere mogelijkheid is de variabele arbeid nader uit te werken, door het werkelijke metabolisme te bepalen.

Daanen e.a. (1993) hebben juist klimaat en duur van de blootstelling in de temperatuursensatie betrokken. Zij kwamen daarbij tot het volgende model voor kleding in de range van 0,162 tot 0,376 m²·K·W⁻¹:

$$T_{\text{sens}} = -12,8 + 0,15 \cdot \text{WCET} - 0,048 \cdot \text{duur} + 39,0 \cdot \text{isol} + 0,001 \cdot \text{WCET} \cdot \text{duur}$$

met T_{sens} = temperatuursensatie voor het gehele lichaam
 WCET = windchill equivalente temperatuur volgens Steadman in °C
 duur = tijdsduur van de blootstelling aan koude in min
 isol = isolatiewaarde van de gedragen kleding in m²·K·W⁻¹.

Nadeel van dit model is dat het bepaald is voor extreme koude en voor hoge(re) temperaturen niet is gevalideerd.

Op basis van de hiervoor genoemde modellen voor de voorspelling van temperatuursensatie zijn de volgende temperaturen van belang: de kerntemperatuur, temperatuur van de extremiteiten en de omgevingstemperatuur, uitgedrukt als WCET, badtemperatuur, luchttemperatuur of buitentemperatuur. Deze parameters zullen in het regulatiemodel zoals beschreven in § 2.1 een rol spelen. De omgevingstemperatuur zal invloed uitoefenen op de huidtemperatuur en bij een temperatuurgradiënt (verstoring van het evenwicht) zal een directe temperatuursensatie ontstaan door de thermoreceptoren in de huid. Het lichaam zal hierop reageren door passende maatregelen. Hierdoor kan een verandering optreden in de temperatuursensatie en een nieuw evenwicht kan zich eventueel instellen.

Verandering in de kerntemperatuur leidt tot fysiologische reacties, waarna de waarneming van de temperatuur anders wordt.

Naast deze voorspelling van algehele lichaamstemperatuursensatie bestaan er ook vergelijkingen voor de lokale thermische sensatie, die niet zijn gebaseerd op de algemene psychofysische wet zoals beschreven door Stevens en Stevens (1960). Deze zijn beschreven o.a. door Havenith e.a. (1993) (1&2) en door Heus e.a. (1995) (3). De formules luiden:

- 1 $T_{\text{sensh}} = -11,7 + 0,417 \cdot T_{\text{hand}} + 0,082 \cdot T_{\text{a}}$ (bij contact met koud oppervlak)
- 2 $T_{\text{sensh}} = -7,9 + 0,296 \cdot T_{\text{hand}} + 0,097 \cdot T_{\text{a}}$ (niet-contactzijde)
- 3 $T_{\text{sensh}} = -44,99 + 0,197 \cdot T_{\text{hand}} + 0,161 \cdot T_{\text{a}} + 0,997 \cdot T_{\text{rect}}$ (hand in water)

met T_{sensh} = temperatuursensatie voor de hand
 T_{rect} = rectaaltemperatuur in °C
 T_{hand} = temperatuur van de hand in °C (in 1 gemeten op de handpalm, in 2 gemeten op de handrug en in 3 berekend als gemiddelde van de 5 vingertemperaturen)
 T_{a} = temperatuur van de omgeving in °C.

Ook bij deze lokale sensaties spelen huid-, kern- en de omgevingstemperatuur een rol. De afwezigheid van kerntemperatuur in de relaties van Havenith e.a. (1993) is mede te verklaren uit het feit dat al of niet verrichten van arbeid (verhoging kerntemperatuur) wel een significante bijdrage aan de verklaarde variantie van temperatuursensatie levert, maar omwille van de eenvoudigheid van de relatie niet is meegenomen in de formule. De hoeveelheid verklaarde variantie met de kerntemperatuur is echter gering, maar dat wil niet

zeggen dat de kerntemperatuur een minder dominante rol speelt in de temperatuursensatie op lokaal niveau. Het kan zijn dat bij een grotere range van kerntemperaturen de bijdrage aan de verklaarde variantie ook groter wordt.

4.1.2 Comfort- en pijnsensatie

De belangrijkste formules voor comfort berekenen temperaturen waarbij men zich nog comfortabel voelt, afhankelijk van activiteit, omgevingsvariabelen en kleding (Fanger, 1970). Fanger (1970) beschrijft comfort in termen van "comfortabel" tot bepaalde mate van "oncomfortabel". Oncomfortabel is meestal die situatie waarin het lichaam niet in thermofysiologisch evenwicht is. Elke verstoring van het evenwicht moet derhalve als oncomfortabel worden aangeduid. Comfort is echter moeilijk te plaatsen in een thermoregulatiemodel, omdat comfort veel verder gaat dan alleen het thermisch comfort.

Pijn is een verbijzondering van extreem (dis)comfort. Pijn duidt op een stimulatie van de nociceptoren, die mogelijk gerelateerd is aan de inactivatie van de proteïnen van de vrije zenuwuiteinden en kent een fasische (felle prikkelende pijn) en een statische respons (zeurderige pijn) (Hardy & Stolwijk, 1966). Die theorie is voor thermische pijn gebaseerd op de volgende aannamen:

- 1 Voor continue thermische pijn en brandwonden geldt bij langdurige blootstelling een drempel van 45°C.
- 2 Thermische pijn is i.t.t. het ontstaan van brandwonden afhankelijk van het temperatuur-niveau, terwijl brandwonden juist een combinatie van temperatuur en blootstellingstijd kennen.
- 3 Een kleine temperatuurstoename boven de 45°C gaat vergezeld van een sterke toename in de intensiteit van de pijn (de psychofysische schaal voor pijn is proportioneel met de logaritme van de proteïne-inactivering voor temperaturen vanaf 45°C) (Hardy & Stolwijk, 1966).

Deze aannamen zijn in overeenstemming met de theorie dat depolarisatie van de pijnreceptoren ontstaat door het verbreken van de molecuulstructuren in het membraan van de receptor. De pijn- en verbrandingsdrempel worden overschreden op het moment dat de proteïne-degradatie en metabole resynthese van de proteïnen geen gelijke tred meer houden. De pijnsensatie kan beschreven worden als een exponentiële functie met de temperatuurverandering. Hilgard (1978) beschrijft pijn inderdaad als een functie van de temperatuur. De formule die alleen geldt voor koudepijn luidt:

$$P = 2,28(18-T)^{0,475}$$

met P = pijnscore op een schaal van 0 tot 10 (vergelijkbaar met de schaal in § 3.2.1)
 T = watertemperatuur in °C
 18 = drempeltemperatuur waar nog geen pijn voelbaar is in °C (Hardy, 1961).

De pijn wordt gemeten als gemiddelde pijnscore, 25 seconden nadat de onderdompeling in het water heeft plaatsgevonden.

Voor hittepijn is nog niet eerder een model opgesteld, maar kan eenzelfde soort algoritme worden gebruikt, dat later experimenteel kan worden getoetst. De formule zal dan als volgt luiden:

$$P_{\text{sens}} = k(T_{\text{huid}} - 45)^a$$

met P_{sens} = pijnsensatie
 T_{huid} = lokale huidtemperatuur in °C
 45 = drempeltemperatuur waar nog geen pijn voelbaar is in °C (Hardy, 1961)
 k, a = constanten.

In deze formule is gekozen voor de huidtemperatuur als variabele, omdat op die manier een directe relatie gelegd wordt tussen de pijnsensatie en de daaraan gekoppelde fysiologische toestand van het lichaam. Op die manier is het mogelijk de tijdsfactor buiten beschouwing te laten.

Hoewel lineaire relaties tussen pijn en temperatuurverloop beschreven zijn door Havenith e.a. (1993) tijdens contact met koude materialen en Heus e.a. (1995) tijdens onderdompeling in koud water, is een exponentieel verloop toch niet onmogelijk. Een eventueel exponentieel verloop van de pijnsensatie als functie van de handtemperatuur is echter niet getoetst. De afkoelingscurven voor de hand als functie van de tijd kenden in hun experimenten wel een exponentieel verloop. Overigens is de pijnsensatie door beiden beschreven als een functie van de lokale huid- en omgevingstemperatuur, waarbij de thermische toestand van het lichaam ook nog meespeelt. De formules luiden:

$$P_{\text{sens}} = 6,4 - 0,258 \cdot T_{\text{vinger}} - 0,047 \cdot T_{\text{omgeving}} \quad (\text{Havenith e.a., 1993})$$

$$P_{\text{sens}} = 78,1 - 0,092 \cdot T_{\text{vinger}} - 0,202 \cdot T_{\text{omgeving}} - 1,97 \cdot T_{\text{kern}} \quad (\text{Heus e.a., 1995})$$

met P_{sens} = pijnsensatie
 T_{vinger} = vingertemperatuur in °C
 T_{omgeving} = omgevingstemperatuur in °C
 T_{kern} = thermische toestand van het lichaam in °C.

(Thermische) pijn kan in het thermoregulatiemodel als een extreme prikkeling van de thermoreceptoren worden gezien, die pas zal optreden als de drempel voor thermische pijnsensatie wordt overschreden. Dat wil zeggen dat thermische koudepijn pas zal optreden beneden de 18°C en thermische hittepijn boven de 45°C. Tussen deze drempels zal geen sprake zijn van pijn. Het mag duidelijk zijn dat met name de temperatuur van de huid van belang is voor de ervaring van pijn en dat kern en omgeving daar indirect een rol bij spelen, nl. door beïnvloeding van de gemiddelde huidtemperatuur van het gehele lichaam.

4.1.3 Vochtigheidssensatie

Vochtigheidsgevoel zal sterk samenhangen met de zweetsecretie. Daar deze een middel is om overtollige lichaamswarmte te verwijderen, zullen negatieve vochtigheidsscores derhalve

in het algemeen alleen voorkomen tijdens een verhoging van de temperatuur. Zoals eerder vermeld (§ 2.3) kunnen zowel een verhoogde kerntemperatuur als een verhoogde (gemiddelde) huidtemperatuur een rol spelen in de zweetsecretie, maar ook kan lokaal de zweetproductie worden geïnduceerd. Nadel e.a. (1971) beschrijven lokaal zweten met de volgende formule:

$$E_l = E_c e^{(T_{hl}-34)/10}$$

met E_l = de lokale zweetsecretie in ml
 E_c = de centrale drive gebaseerd op de gemiddelde huid- en kerntemperatuur
 T_{hl} = de lokale huidtemperatuur in °C.

Op vergelijkbare manier komen zij (Nadel e.a., 1971) tot een formule om de zweetrespons voor het gehele lichaam te beschrijven:

$$m_{sw} = \Phi \Psi [\alpha' (T_{es} - 36,7) + \beta' (\bar{T}_h - 34,0)] e^{(\bar{T}_h - 34,0)/10}$$

met m_{sw} = lichaamssweetrespons in ml
 Φ = de proportie tussen zweetproductie en centrale zweetdrive
 Ψ = acclimatisatietoestand van het lichaam
 T_{es} = kerntemperatuur (oesophagus) in °C
 \bar{T}_h = gemiddelde huidtemperatuur in °C
 α', β' = proportionele constanten.

Nielsen en Endrusick (1990) komen met een formule voor de berekening van lokale vochtigheid van de huid als maat voor vochtigheid, die luidt:

$$RH_h = \frac{(P_h - P_o)}{(P_{s,h} - P_o)}$$

met RH_h = lokale huidvochtigheid in %
 P_h = dampdruk op het huidoppervlak in kPa
 $P_{s,h}$ = verzadigde dampdruk bij de gemeten huidtemperatuur in kPa
 P_o = dampdruk omgeving in kPa.

Om hier een waarde aan te koppelen voor de vochtigheidssensatie kan gebruik worden gemaakt van de door Havenith en Van Middendorp (1985) gevonden relatie:

$$RH_{sens} = 3,21 + 0,082 * RH_h$$

met RH_{sens} = vochtigheidssensatie
 RH_h = relatieve vochtigheid van de huid in %.

De vochtigheidssensatiescore loopt hierbij van "zeer droog" (2) tot "drijfnat" (14). Dit is dezelfde schaal als door Van de Linde (1989) is toegepast en ook nu weer wordt voorgesteld, maar dan met andere waarden [4 (zeer droog) tot -8 (drijfnat)].

In de oorspronkelijke formule, zoals die door Havenith en Van Middendorp (1985) is gevonden, bleek naast de afhankelijkheid van de relatieve vochtigheid van de huid ook een relatie te bestaan tussen vochtigheidsscore, de zweetproductie en de kerntemperatuur. De oorspronkelijke formule kan dan als volgt worden weergegeven:

$$RH_{sens} = -13,64 + 0,051 \cdot RH_h + 0,022 \cdot \text{zweetproductie} + 0,47 \cdot T_{rect}$$

met RH_{sens} = vochtigheidssensatie
 RH_h = relatieve vochtigheid van de huid in %
 T_{rect} = kerntemperatuur (rectaal) in °C
 zweetproductie in ml geproduceerd zweet.

Duidelijk in al deze formules die iets over de vochtigheid zeggen blijkt het sterke verband met lichaamstemperaturen. Sensoren om vocht waar te nemen zijn niet gevonden, d.w.z. dat vocht vooral van invloed is op de huidtemperatuur en zo een verandering in temperatuursensatie teweegbrengt. Wel kan tactiele informatie worden verkregen bijvoorbeeld door vocht op de huid of natte kleding die aan de huid kleeft (Sweeney & Branson, 1990).

4.1.4 Integratie

Integratie van de comfortmodellen met de bestaande thermoregulatorische modellen en de kledingmodellen is nog erg moeilijk. Problemen met standaardisatie dienen eerst opgelost te worden. Een ander probleem met de integratie is dat er in de kledingfysica vooral sprake van analytische modellen, terwijl de fysiologie en psychofysiologie vooral van empirische modellen uitgaan. De empirische modellen zijn veelal bepaald aan de hand van experimentele data en vaak niet (voldoende) gevalideerd.

De belangrijkste stap op dit moment is de bestaande modellen te inventariseren, alle modellen daarna op hun waarde en toepassing te beoordelen, en de modellen te valideren. De modellen die gevalideerd zullen moeten worden zijn die voor lokale temperatuursensatie, algehele lichaamstemperatuursensatie, (thermisch) comfort, (thermische) pijn en (lokale) vochtigheid en moeten zoveel mogelijk gebruikmaken van de thermofysiologische parameters.

Lokale temperatuursensatie kan beschreven worden als een exponentiële functie, omdat kleine veranderingen t.o.v. een neutrale toestand duidelijk en snel waarneembaar zijn (Heus & Daanen, 1993). De voorgestelde formule luidt:

$$T_{sens} = k e^{\alpha T_{huid}} \quad (\text{Banks, 1969})$$

met T_{sens} = temperatuursensatie
 k = constante (nog nader vast te stellen)
 α = constante (nog nader vast te stellen)
 T_{huid} = lokale huidtemperatuur in °C.

Algehele temperatuursensatie kan eenvoudiger worden beschreven met een lineair model, omdat verandering in temperatuursensatie voor het gehele lichaam een langzamer verloopend

proces is, vanwege de afhankelijkheid van extremitateits-, kerntemperatuur, relatieve huidvochtigheid en arbeid. De voorgestelde formule luidt:

$$T_{sens} = k + a \cdot T_{extr} + b \cdot T_{rect} + c \cdot RH_{huid} + d \cdot \text{arbeid} \quad (\text{Havenith \& Van Middendorp, 1985})$$

met T_{sens} = temperatuursensatie
 T_{extr} = temperatuur extremiteten in °C
 T_{rect} = kerntemperatuur in °C
 T_a = omgevingstemperatuur in °C
 RH_{huid} = relatieve vochtigheid van de huid in %
 arbeid = metabolisme in W
 k, a, b, c, d = constanten (nog nader vast te stellen).

Comfort zal nog beschreven moeten worden als een functie. In ieder geval zal worden uitgegaan van de schaal voor comfort zoals die in ISO 10551 (1992) is vastgelegd.

Pijn speelt voornamelijk op lokaal niveau en zal worden beschreven als een exponentiële functie. De voorgestelde formule luidt voor koudepijn:

$$P_{sens} = 2,28(18 - T_{huid})^{0,475} \quad (\text{Hilgard, 1978})$$

met P_{sens} = pijnsensatie
 T_{huid} = lokale huidtemperatuur in °C
 18 = drempeltemperatuur waar nog geen pijn voelbaar is in °C.

Voor hittepijn luidt de formule:

$$P_{sens} = k(T_{huid} - 45)^a$$

met P_{sens} = pijnsensatie
 T_{huid} = lokale huidtemperatuur in °C
 45 = drempeltemperatuur waar nog geen pijn voelbaar is in °C
 k, a = constanten (nader vast te stellen).

Ervaren vochtigheid zal worden beschreven met het door Havenith en Van Middendorp (1985) voorgestelde model, dat luidt:

$$RH_{sens} = k + a \cdot RH_h + b \cdot \text{zweetproductie} + c \cdot T_{rect}$$

met RH_{sens} = vochtigheidssensatie
 RH_h = relatieve vochtigheid van de huid in %
 T_{rect} = kerntemperatuur (rectaal) in °C
 k, a, b, c = constanten (nader vast te stellen).

Vervolgens zullen afspraken moeten worden gemaakt (internationale standaardisatie) over de uiteindelijke output van de modellen. De output van een warmtebalansmodel moet dan kunnen worden gebruikt als input voor het comfortmodel. Bijvoorbeeld, de uitkomst van een kledingmodel is dat bij een bekende omgevingstemperatuur en een vaste arbeid bij kleding met een bepaalde isolatiewaarde de gemiddelde huidtemperatuur oploopt tot een gegeven

uitkomst. Deze gemiddelde huidtemperatuur moet dan als input kunnen dienen om onder dezelfde omstandigheden de ervaren comforttoestand van die persoon aan te geven. De interface tussen beide modellen zal kern-, gemiddelde huid- en lokale huidtemperaturen moeten bevatten en daarnaast ook nog de relatieve vochtigheid van de huid en de zweetproductie van het lichaam.

5 DISCUSSIE

Hoewel in het dagelijks leven comfort en temperatuursensatie moeilijk van elkaar te scheiden zijn, is in het voorgaande duidelijk geworden dat comfort meer is dan alleen temperatuursensatie. Ook vochtigheid en pijngevoel spelen een rol in de ervaring van comfort. Bovendien is het duidelijk dat temperatuur en comfort als twee aparte zaken zijn te beschouwen, die zowel fysiologisch als psychologisch van elkaar te scheiden zijn. Temperatuursensatie is volgens Hensel (1981) een rationele gewaarwording, die beschreven kan worden in termen van een objectief wereldbeeld, zoals bijvoorbeeld in de uitspraak: "Het is koud" of "Het voelt koud". Deze temperatuurgewaarwordingen zullen voor het gehele lichaam zoveel mogelijk worden beschreven met fysiologische parameters als kerntemperatuur, extremitéistemperatuur. Gekozen is voor een lineaire relatie, omdat deze goed beschrijft hoe de globale temperatuursensatie verloopt. Omdat de gebruikte schalen afwijken van de internationale norm zullen de constanten in de formule opnieuw moeten worden vastgesteld en zal de huidige formule moeten worden gevalideerd.

Comfort daarentegen beschrijft een meer emotionele ervaring, uitgedrukt als: "Ik heb het koud". Met deze laatste uitdrukking geeft men aan dat men zich onplezierig voelt, terwijl de eerste uitspraak daarover geen enkele informatie geeft. Men kan zich namelijk best plezierig voelen als het koud is of als het koud voelt. Vooral mannen zullen langer comfortabel zijn in een koude omgeving dan vrouwen (Hensel, 1981), terwijl het omgekeerde vaak geldt in een warme omgeving. Comfort onder extreme klimaatsomstandigheden is nog niet vastgelegd in modellen. Bovendien is een beschrijving van comfort in termen van fysiologische parameters ongebruikelijk. Meestal wordt comfort in klimaatparameters vastgelegd. Om die reden zullen de valideringsexperimenten tot comfortbeschrijvingen moeten leiden onder alle klimatologische omstandigheden.

Pijn speelt ook een belangrijke rol in de ervaring van comfort. Pijn is een verder gaande vorm van discomfort, die gepaard kan gaan met temperatuurprikkel. Aanraking van hete of koude oppervlakten kan een pijnsensatie oproepen, die men over het algemeen als onplezierig ervaart. Afwezigheid van pijn houdt echter niet in dat men zich plezierig voelt en geen temperatuursensaties heeft. Pijn speelt zich meestal af op lokaal niveau. De processen die hiermee gepaard gaan vertonen een exponentieel verloop, vandaar dat voor thermische pijn voor exponentiële functies is gekozen.

Eveneens is het duidelijk geworden dat vochtigheid een rol speelt in de ervaring van comfort. Een warme omgeving kan als onplezierig worden ervaren zolang men niet zweet. Als daarna de zweetproductie op gang komt en zodoende warmte aan het lichaam wordt

onttrokken, kan het discomfort veranderen in comfort. Als men daarna echter een koelere ruimte betreedt kan hetzelfde vocht al snel voor hernieuwd gevoel van discomfort leiden. Hoewel tactiele sensaties of juist het ontbreken daarvan voor vochtigheidssensatie is in § 4.1.3 gememoreerd dat het niet zozeer de vochtigheid zelf is, als wel de mogelijkheid tot beïnvloeding van de temperatuur die een rol speelt in het comfort en temperatuurgevoel.

Temperatuursensatie speelt echter niet alleen bewust, maar ook onbewust een belangrijke rol in de thermoregulatie (Hardy, 1961). Gedurende de slaap wordt de lichaamstemperatuur (kern- en huidtemperatuur) in een breed gebied van omgevingstemperaturen ($5-35^{\circ}\text{C}$) constant gehouden, maar plotselinge temperatuurveranderingen van de omgeving zorgen voor ontwaken (Hardy, 1961). Het ontwaken is een mechanisme dat ervoor moet zorgen dat passende maatregelen genomen kunnen worden om de lichaamstemperatuur binnen bepaalde (comfortabele) marges te houden.

Thermisch comfort speelt een belangrijke rol in zowel de uitoefening van fysieke taken als wel de uitoefening van mentale taken. Als men zich oncomfortabel voelt, zal het prestatieniveau dalen. Het is daarom van groot belang dat men zich onder alle omstandigheden zo comfortabel mogelijk voelt. Veel onderzoek naar de beleving van comfort is reeds uitgevoerd. Een nadeel van veel van deze onderzoeken is dat ze meestal gelden onder statische klimaatcondities, of in gematigde klimaten.

Onderzoek naar de mogelijkheden het comfort van hypotherme mensen te beïnvloeden door hun handen te verwarmen en het comfort van hyperthermen te beïnvloeden door hun handen te koelen is reeds gedaan (Mower, 1976). Het comfort van mensen kan op die manier wel worden beïnvloed, maar de globale temperatuursensaties blijven ongewijzigd. De temperatuursensaties op lokaal niveau wijzigen op dat moment natuurlijk zeer sterk. Deze exponentieel verlopende reacties waren de aanleiding om temperatuursensaties op lokaal niveau te beschrijven als een exponentiële functie van de fysiologische variabelen.

De experimenten van Mower (1976) bevestigen eens te meer dat thermische stimuli een temperatuursensatie geven als gevolg van fysiologische reacties van het lichaam, maar dat comfort meer een emotionele lichaamstoestand is. De mogelijkheden om prestatie van mensen, zowel fysiek als mentaal, te beïnvloeden op grond van veranderingen in perifere temperatuur zijn nog niet uitgebreid onderzocht. Tenslotte kan ook andere zintuiglijke informatie leiden tot temperatuur- en comfortbeleving, bijvoorbeeld kleur, licht of angst. Iets dat rood gekleurd is zal warmer aandoen dan iets blauws. Iemand zal zich in een bedreigende situatie warm voelen. Het gaat echter te ver dit soort dingen binnen deze context te behandelen.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op het gebied van comfort bestaat nog niet op alle punten eenduidigheid. Om nu toch tot onderling vergelijkbare resultaten te komen op het gebied van subjectieve sensaties is gekozen voor een aantal modellen op het gebied van globale en lokale temperatuursensaties,

vochtigheidssensaties en pijnsensaties. Comfortsensaties voor extreme klimaten zijn nog niet vastgelegd. Comfort gemeten in een binnenklimaat is wel vastgelegd in een norm en daarover bestaat dus wel de eenduidigheid die nodig is om alle onderzoeksresultaten met elkaar te vergelijken. Een nadeel is dat die norm alleen geldt voor een zeer beperkte klimaat-range (binnenklimaat). Zodra de temperaturen en windsnelheden extremere waarden aannemen gelden andere waarden. Om hierover uitspraken te kunnen doen moet eerst meer onderzoek worden verricht naar de ervaring van comfort onder extreme omstandigheden en moeten ook internationale afspraken gemaakt worden hoe comfort te definiëren.

Als uitgangspunt in het experimenteel onderzoek zullen de internationaal vastgelegde schalen voor subjectieve sensaties gelden en waar die (pijn en vochtigheid) nog niet zijn vastgesteld zullen schalen gebruikt worden die vaker in de literatuur genoemd worden. Tevens zal dergelijk experimenteel onderzoek moeten leiden tot een validering van de bestaande modellen voor subjectieve sensaties. Voorgesteld wordt om in een eerste experiment huidige modellen voor globale temperatuursensaties te valideren en daar waar nodig aan te vullen met de experimenteel verkregen resultaten en tevens vergelijkingen op te stellen voor comfortervaring. In een later stadium zullen experimenten moeten aantonen of thermisch (dis)comfort op eenvoudige wijze is te beïnvloeden.

In de eerste fase zullen met name de eerder opgestelde temperatuursensatievergelijkingen worden gevalideerd door meerdere combinaties van arbeid en klimaat aan de proefpersonen aan te bieden, waarbij warmtebalansmetingen gedaan worden en de proefpersonen zelf continu hun subjectieve sensaties scoren.

REFERENCES

- Anderson, N.H. (1972). Cross-task validation of functional measurement. *Perception & Psychophysics*, 12(5), 389-395.
- Anderson, N.H. (1974). Algebraic models in perception. In E.C. Carterette & M.P. Friedman (Eds.), *Handbook of Perception* (Vol. II). New York: Academic Press.
- Banks, W.P. (1969). Temperature sensitivity: One subjective continuum or two. *Perception & Psychophysics*, 6(3), 189-192.
- Benzinger, T.H. (1969). Heat regulation: Homeostasis of central temperature in man. *Physiological Reviews*, 49, 671-759.
- Bernards, J.A. & Bouman, L.N. (1983). *Fysiologie van de mens*. Utrecht: Bohn, Scheltema & Holkema.
- Bleichert, A., Behling, K., Scarperi, M. & Gilbert, T. (1973). Thermoregulatory behaviour of man during rest and exercise. *Pflügers Archive*, 338, 303-312.
- Bligh, J. (1961). Possible temperature-sensitive elements in or near the vena cava of sheep. *Journal of Physiology*, 159, 85-86.
- Bligh, J. & Johnson, K.G. (1973). Glossary terms for thermal physiology. *Journal of Applied Physiology*, 35, 941-961.
- Cabanac, M., Massonnet, B. & Belaiche, R. (1972). Preferred skin temperature as a function of internal and mean skin temperature. *Journal of Applied Physiology*, 33, 699-703.
- Cena, K. & Clark, J.A. (1981). Physics, physiology and psychology. In K. Cena & J.A. Clark (Eds.), *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Amsterdam: Elsevier.
- Colquhoun, W.P. & Goldman, R.F. (1972). Vigilance under induced hyperthermia. *Ergonomics*, 15, 621-632.
- Cranston, W.I., Hellon, R.F. & Townsend, Y. (1978). Thermal stimulation of intra-abdominal veins in conscious rabbits. *Journal of Physiology*, 244, 49-52.
- Crawshaw, L.I., Nadel, E.R., Stolwijk, J.A.J. & Stamford, B.A. (1975). Effect of local cooling on sweating rate and cold sensation. *Pflügers Archive*, 354, 19-27.
- CV 26 (1993). *Gezonde kantoorgebouwen: Aandachtspunten bij ontwikkeling en beheer*. Den Haag: Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, Directoraat van de Arbeid, Directie Gezondheid, Arbeidsinspectie.
- Daanen, H.A.M. & Heus, R. (1993). Niet gepubliceerde resultaten.
- Daanen, H.A.M., Wammes, L.J.A. & Vrijkotte, T.G.M. (1993). *Wind-chill en handvaardigheid* (Rapport IZF 1993-A7). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO¹.
- Eisenman, J.S. (1972). Unit activity studies of thermoresponsive neurons. In J. Bligh & R.E. Moore (Eds.), *Essays on temperature regulation*. Springfield, IL: Thomas.
- Enander, A. (1987). Effects of moderate cold on performance on psychomotor and cognitive tasks. *Ergonomics*, 30, 1431-1445.
- Fanger, P.O. (1970). *Thermal comfort*. New York: McGraw-Hill.
- Gagge, A.P. (1940). Standard operative temperature, generalized temperature scale applicable to direct and partitional calorimetry. *American Journal of Physiology*, 131, 93.

¹ Op 1 januari 1994 werd de naam "Instituut voor Zintuigfysiologie TNO" vervangen door "TNO Technische Menskunde".

- Gagge, A.P. (1981). Rational temperature indices of thermal comfort. In K. Cena & J.A. Clark (Eds.), *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Amsterdam: Elsevier.
- Gagge, A.P., Fobelets, A.P. & Berglund, L.G. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92 (2B), 709-731.
- Gagge, A.P. & Nishi, V. (1976). Physical indices of the thermal environment. *ASHRAE Journal*, January 1976.
- Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J. & Hardy, J.D. (1967). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 1, 1-20.
- Goldman, R.F. (1977). The role of clothing in modifying the human thermal comfort range. *Symposium on Thermal Comfort*, Paris: December 14-15.
- Gonzalez, R.R., Berglund, L.G. & Gagge, A.P. (1978). Indices of thermoregulatory strain for moderate exercise in the heat. *Journal of Applied Physiology*, 44, 889-899.
- Gonzalez, R.R. (1981). Exercise physiology and sensory responses. In K. Cena & J.A. Clark (Eds.), *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Amsterdam: Elsevier.
- Gonzalez, R.R., Pandolf, K.B. & Gagge, A.P. (1973). Physiological responses and warm discomfort during heat strain. *Archives of Scientific Physiology*, 27, A563-A571.
- Guyton, A.C. (1981). *Textbook of Medical Physiology*. Philadelphia, PA: W.B. Saunders Company (pp. 611-625).
- Gystad, T. & Bakkevig, M.K. (1994). Correlation between different formulas for mean skin temperature and thermal comfort. In J. Frim, M.B. Ducharme & P. Tikuisis (Eds.), *Proceedings of the sixth International Conference on Environmental Ergonomics* (pp. 162-163). Montebello, QB, Canada.
- Hardy, J.D. (1961). Physiology of temperature regulation. *Physiological Reviews*, 41, 521-606.
- Hardy, J.D. (1970). Thermal comfort: skin temperature and physiological temperature regulation. In J.D. Hardy, A.P. Gagge & J.A.J. Stolwijk (Eds.), *Physiological and Behavioral Temperature Regulation* (pp. 856-873). Springfield, IL: Thomas.
- Hardy, J.D. & Stolwijk, J.A.J. (1966). Tissue temperature and thermal pain. In A.V.S. de Reuck & J. Knight (Eds.), *Touch, Heat and Pain*. London: Churchill Ltd.
- Hardy, J.D., Stolwijk, J.A.J. & Gagge, A.P. (1971). Man. In G.C. Whittow (Ed.), *Comparative Physiology of Thermoregulation* (Vol. II, Chapter 5; Mammals). New York: Academic Press.
- Havenith, G. (1995). Utrechts Nieuwsblad 25 juli 1995.
- Havenith, G. & Heus, R. (1989). *Isolatie-, comfort- en vochtaccumulatiemetingen aan zes slaapzakprototypen voor de Koninklijke Landmacht* (Rapport IZF 1989-40). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.
- Havenith, G., Linde, F.J.G. van de & Heus, R. (1993). Pain, thermal sensations and cooling rates of hands while touching cold materials. *European Journal of Applied Physiology*, 65, 43-51.
- Havenith, G. & Middendorp, H. van (1985). *Thermische eigenschappen van prototypen van het gevechtsskledingsysteem uit de PSU-80* (Rapport IZF 1985 C-21). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.
- Hensel, H. (1952). Physiologie der Thermoreception. *Ergebnisse der Physiologie*, 47, 166.
- Hensel, H. (1977). Processing of thermal information. In *Thermal Comfort*. INSERM 75 (pp. 39-56).

- Hensel, H. (1981). *Thermoreception and Temperature Regulation*. London: Academic Press.
- Hensel, H., Brück, K. & Raths, P. (1973). Homeothermic organisms: Cutaneous thermoreception. In H. Precht, J. Christopherson, H. Hensel & W. Larcher (Eds.), *Temperature and Life*. Berlin: Springer-Verlag.
- Heus, R., Daanen, H.A.M. & Havenith, G. (1995). Physiological criteria for functioning of hands in the cold. *Applied Ergonomics*, 26, 5-13.
- Heus, R., Vrijkotte, T.G.M. & Lotens, W.A. (1992). *Thermisch comfort van zes stoelen voor autobussen van verenigd streekvervoer Nederland* (Rapport IZF 1992 C-18). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.
- Hilgard, E.R. (1978). Pain perception in man. In H. Autrum, R. Jung, W.R. Loewenstein, D.M. MacKay & H.-L. Teuber (Eds.), *Handbook of Sensory Physiology* (Vol. VIII; Perception). Berlin: Springer-Verlag.
- Hollies, N.R.S. & Goldman, R.F. (1977). *Clothing comfort. Interaction of thermal, ventilation, construction and assessment factors*. Ann Arbor, MI: Science Publishers Inc.
- Houdas, Y. & Ring, E.F.J. (1982). *Human Body Temperature; its measurement and regulation*. New York: Plenum Press.
- House, J.R. (1994). Hand immersion as a method of reducing heat strain during rest periods. In J. Frim, M.B. Ducharme & P. Tikuisis (Eds.), *Proceedings of the sixth International Conference on Environmental Ergonomics* (pp. 10-11). Montebello, QB, Canada.
- Humphreys, M.A. (1981). Comfortable temperatures. In K. Cena & J.A. Clark (Eds.), *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Amsterdam: Elsevier.
- ISO 10551 (1992). *Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales*. Geneva, CH: International Organization for Standardization.
- Jetté, M., Romet, T., Reardon, F., Thoden, J., Holt, L., Johnson, D. & Livingstone, S. (1994). Canadian cold weather clothing project. In J. Frim, M.B. Ducharme & P. Tikuisis (Eds.), *Proceedings of the sixth International Conference on Environmental Ergonomics* (pp. 68-69). Montebello, QB, Canada.
- LeBlanc, J., Blais, B., Barabé, B. & Côté, J. (1976). Effects of temperature and wind on facial temperature, heart rate and sensation. *Journal of Applied Physiology*, 40, 127-131.
- Libert, J.P., Candas, V. & Vogt, J.J. (1979). Effect of rate of change in skin temperature on local sweating rate. *Journal of Applied Physiology*, 47, 306-311.
- Linde, F.J.G. van de, Daanen, H.A.M., Heus, R. & Bruijs-Schaapveld, B.C.T.M. (1991). *Experimentele vergelijking van perifere opwarmingsmethoden voor onderkoelden* (Rapport IZF 1991 A-53). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.
- Linde, F.J.G. van de, Wammes, L.J.A. & Heus, R. (1989). *Thermisch comfort, waterdichtheid en ergonomie van regenkleding* (Rapport IZF 1989 C-7). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.
- Lotens, W.A. (1993). *Heat transfer from humans wearing clothing*. Thesis, Soesterberg, The Netherlands.
- McIntyre, D.A. (1981). Design criteria for a comfortable environment. In K. Cena & J.A. Clark (Eds.), *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Amsterdam: Elsevier.
- Mower, G.D. (1976). Perceived intensity of peripheral thermal stimuli is independent of the internal body temperature. *Journal of Comparative Physiology and Psychology*, 90, 1152-1155.

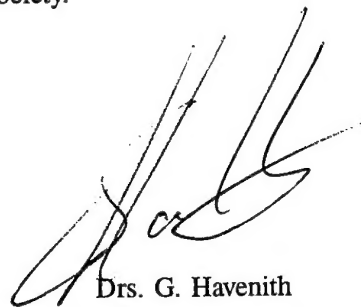
- Nadel, E.R., Bullard, R.W. & Stolwijk, J.A.J. (1971). Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *Journal of Applied Physiology*, 31, 80-87.
- NEN-ISO 7730 (1989). *Gematigde thermische binnencondities, bepaling van de PMV- en de PPD-waarden specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid*. Delft: Nederlands Normalisatie Instituut.
- Nielsen, R. & Endrusick, T.L. (1990). Sensations of temperature and humidity during alternative work/rest and the influence of underwear knit structure. *Ergonomics*, 33, 221-234.
- Nishi, Y. & Gagge, A.P. (1971). *Journal of Physiology*, 63, 365.
- Nowell Jones, F. (1974). Overview of psychophysical scaling methods. In E.C. Carterette & M.P. Friedman (Eds.), *Handbook of Perception* (Vol. II). New York: Academic Press.
- Poulton, E.C. & Edwards, R.S. (1974). Interactions and range effects in experiments on pairs of stresses: mild heat and low-frequency noise. *Journal of Experimental Psychology*, 102, 621-628.
- Precht, H., Christopherson, J., Hensel, H. & Larcher, W. (1973). *Temperature and Life*. Berlin: Springer-Verlag.
- Provins, K.A. (1966). Environmental heat, body temperature and behaviour: an hypothesis. *Australian Journal of Psychology*, 18, 118-129.
- Rawson, R.O. & Quick, K.P. (1970). Evidence of deep-body thermoreceptor response in intraabdominal heating of the ewe. *Journal of Applied Physiology*, 28, 813-820.
- Rawson, R.O. & Quick, K.P. (1971). Thermoregulatory responses to temperature signals from the abdominal viscera of the sheep. *Journal of Physiology*, 63, 399-402.
- Rawson, R.O. & Quick, K.P. (1976). Unilateral splanchnotomy; its effect on the response to intra-abdominal heating in the ewe. *Pflügers Archive*, 330, 362-365.
- Rein, F.H. (1925). Über die Topographie der Warmempfindung. Beziehungen zwischen Innervation und receptorischen Endorganen. *Zeitschrift für Biologie*, 82, 515-535.
- Reuck, A.V.S. de & Knight, J. (1966). *Touch, Heat and Pain*. A Ciba Foundation symposium. London: Churchill Ltd.
- Saltin, B., Gagge, A.P. & Stolwijk, J.A.J. (1968). Muscle temperature during submaximal work exercise in man. *Journal of Applied Physiology*, 25, 679-688.
- Schönbaum, E. & Lomax, P. (1990). *Thermoregulation; Physiology and Biochemistry*. New York: Pergamon Press.
- Siple, P.A. & Passel, C.F. (1945). Measurements of dry atmospheric cooling in sub-freezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89(1), 177-199.
- Steadman, R.G. (1971). Indices of windchill of clothed persons. *Journal of Applied Meteorology*, 10, 674-683.
- Stevens, S.S. (1974). Perceptual magnitude and its measurement. In E.C. Carterette & M.P. Friedman (Eds.), *Handbook of Perception* (Vol. II). New York: Academic Press.
- Stevens, J.C. (1979). Variation of cold sensitivity over the body surface. *Sensory Processes*, 3(4), 317-326.
- Stevens, J.C., Marks, L.E. & Simonsson, D.C. (1974). Regional sensitivity and spatial summation in the warmth sense. *Physiology and Behaviour*, 13, 825-836.
- Stevens, J.C. & Stevens, S.S. (1960). Warmth and cold: dynamics of sensory intensity. *Journal of Experimental Psychology*, 60(3), 183-192.

- Stolwijk, J.A.J. (1971). *A mathematical model of physiological temperature regulation in man* (NASA contractor report CR-1855). Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration.
- Stolwijk, J.A.J. & Hardy, J.D. (1966). Temperature regulation in man—a theoretical study. *Pflügers Archive*, 291, 129-162.
- Strughold, H. & Porz, R. (1931). Die Dichte der Kaltpunkte auf der Haut des menschlichen Körpers. *Zeitschrift für Biologie*, 91, 563-571.
- Sweeney, M.M. & Branson, D.H. (1990). Sensorial comfort. Part I: A Psychophysical Method for Assessing Moisture Sensation in Clothing. *Textile Research Journal*, 60, 371-377.
- Tanaka, M., Yamazaki, S., Ohnaka, T., Harimura, Y., Tochihara, Y., Matsui, J. & Yoshida, K. (1985). Effects of feet cooling on pain, thermal sensation and cardiovascular responses. *Journal of Sports Medicine*, 25, 32-39.
- Thellier, F., Althabégoity, F. & Cordier, A. (1994). Modelling of local thermal sensations of a car driver in winter conditions. In J. Frim, M.B. Ducharme & P. Tikuisis (Eds.), *Proceedings of the sixth International Conference on Environmental Ergonomics* (pp. 190-191). Montebello, QB, Canada.
- Thellier, F. (1995). Personal letter.
- Voorhoeve, P.E. (1978). *Leerboek der Neurofysiologie*. Amsterdam: Elsevier.
- Wilkinson, R.T., Fox, R.H., Goldsmith, R., Hampton, I.F.G. & Lewis, H.E. (1964). Psychological and physiological responses to raised body temperature. *Journal of Applied Physiology*, 19, 287-291.
- Winslow, C.E.A., Herrington, L.P. & Gagge, A.P. (1937). Physiological reactions of the human body to various atmospheric humidities. *American Journal of Physiology*, 123, 288-299.
- Winslow, C.E.A. & Herrington, L.P. (1949). *Temperature and Human Life*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Yaglou, C.P. & Miller, W.E. (1925). Effective temperature with clothing. *ASHRAE Transactions*, 31, 89-99.
- Zotterman, Y. (1959). Thermal sensations. In *Handbook of Physiology, section I: Neurophysiology, volume I*. Washington, DC: American Physiological Society.

Soesterberg, 7 augustus 1996



Drs. R. Heus
(1^e auteur)



Drs. G. Havenith
(projectleider)

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) RP 96-0167	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER TM-96-A030
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 789.2	5. CONTRACT NUMBER A93/KL/317	6. REPORT DATE 7 August 1996
7. NUMBER OF PAGES 48	8. NUMBER OF REFERENCES 92	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE De fysiologische basis voor thermisch comfort onder diverse klimatologische omstandigheden; een voorstudie (The physiological basis for thermal comfort in different climates; a preliminary study)		
11. AUTHOR(S) R. Heus and G. Havenith		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Human Factors Research Institute Kampweg 5 3769 DE SOESTERBERG		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Director of Army Research and Development Van der Burchlaan 31 2597 PC DEN HAAG		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE) Thermal comfort is very important for optimal functioning of humans. It gives information about the thermal state of the body, by which the human body can take physiological measures or the human can take behavioural measures to maintain thermal control. This will be the base of this study. Thermal comfort is sensed by warm and cold receptors in the skin, but also in deeper structures of the body. Pain receptors play a role in the detection of extreme cold and heat. The hypothalamus is the regulation and detection centre of temperature in the body, receiving afferent information of the receptors and sending efferent information to the effectors by which the body controls its temperature. Thermal comfort is determined by the temperature, pain and comfort sensations of the body. Also the experience of humidity can influence the comfort feelings. A problem in the study of comfort is the large diversity of the subjective scales used, which makes it difficult to compare the developed models. The goal of this study however is to make an inventory of most commonly used models and to judge them on useability for the existing thermoregulatory models. Local sensations are described as power functions based on psycho-physical functions and global sensations are described as linear functions. The most important dependent variables in global thermal comfort are core temperature, temperature of the extremities and temperature of the environment. In local thermal comfort and pain, temperature of the skin is most important. Humidity sensation of the skin is determined by temperature of the core, sweat production and local relative humidity of the skin.		
16. DESCRIPTORS Comfort Subjective Sensations Thermoregulation		IDENTIFIERS
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Unlimited availability		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)

VERZENDLIJST

1. Directeur M&P DO
2. Directie Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling Defensie
- Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
3. {
Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
4. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KLu
- Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
5. {
Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
- 6, 7 en 8. Bibliotheek KMA, Breda
- 9, 10 en 11. Ing. J.M. de Koning, Hoofd Bureau Techniek, Dienst Materieel KL/BVC PGU,
Den Haag

Extra exemplaren van dit rapport kunnen worden aangevraagd door tussenkomst van de HWOs of de DWO.